超越屏幕：运动视频游戏训练可以更好提升儿童执行功能

马超[1,2]，赵璐[1,2]，赵鑫[1,2]

（[1] 甘肃省行为与心理健康重点实验室，兰州，730070，中国）

（[2] 西北师范大学心理学院，兰州，730070，中国）

摘　要　运动视频游戏作为一种兼顾身体运动与认知任务的创新型训练方式，其不同组合模式对儿童执行功能的影响，以及认知参与和运动强度在其中的作用，仍是当前运动-认知领域亟待深入探索的关键问题。基于此，本研究通过两个实验系统考察究竟何种形式的运动视频游戏训练更有利于儿童执行功能的发展。实验 1 采用融合式(运动视频游戏)和结合式(运动+视频游戏)两种训练模式，探讨其对儿童执行功能的影响差异。结果发现，运动视频游戏训练显著提升了儿童的反应抑制和工作记忆刷新能力，且效果明显优于运动+视频游戏训练。实验 2 进一步分析运动强度和认知参与在运动视频游戏训练中的起效机制。结果发现，与运动强度相比，认知参与对儿童反应抑制能力的影响更为显著且持久。此外，尽管运动强度和认知参与均有助于提升工作记忆刷新能力，但二者并未表现出交互作用，可能涉及不同的认知通路。总的来说，本研究揭示了运动视频游戏训练在儿童执行功能提升方面的显著效果及作用机制，提示未来研究应优先采用融合式训练模式，强化认知任务的设计，并结合个体差异调整运动强度，以优化训练效果。

关键词　运动视频游戏，执行功能，儿童，运动强度，认知参与

1　引言

执行功能(Executive function, EF)作为调控认知加工、情绪调节和行为控制的核心心理机制，已成为发展心理学和教育心理学领域的重要研究对象。经典模型将其划分为三大核心成分：抑制控制、工作记忆和注意转换(Miyake et al., 2000; Diamond, 2013)。其中，抑制控制又可进一步细化为反应抑制与干扰抑制，前者强调对冲动反应的抑制，后者则指向对无关信

投稿日期：2025-03-27

基金项目：国家自然科学基金项目 (32260207)，教育部人文社会科学研究项目 (21XJA190005)资助。

通讯作者：赵鑫，教授，E-mail: psyzhaoxin@nwnu.edu.cn

息或干扰源的排除(马超 等, 2025)。这些执行功能成分在儿童认知发展的多个维度中均发挥着至关重要的作用(Blakey et al., 2020)，尤以数学、语言理解与阅读等学业能力的发展最为显著(Schäefer et al., 2024; 赵鑫 等, 2020; 祝孝亮 & 赵鑫, 2023)。同时，执行功能还是情绪调节与社会适应的关键支撑，其缺陷被广泛认为与注意缺陷多动障碍(ADHD)、冲动控制障碍和内化问题等心理风险密切相关(Cumming et al., 2019; Mothes et al., 2017)。

尽管执行功能在整个生命历程中不断发展，但儿童期被普遍视为其发展最迅速、最具可塑性的关键阶段(McEwen & Morrison, 2013; Contreras-Osorio et al., 2022)。这一观点不仅得到了神经发育研究的支持，也为儿童阶段的干预提供了理论基础。已有研究表明，相比于成年人，儿童群体在接受计算机化执行功能训练(如 Go/No-go、Stroop、N-back 任务)后表现出了更强的训练效果，这种效果不仅体现在特定任务表现(如反应抑制、干扰抑制、工作记忆刷新)的提升上，还体现在对其他认知成分的迁移方面，如前瞻记忆和流体智力等(Zhao & Jia, 2019; Zhao et al., 2018a, 2018b)。此外，通过数字转换任务所进行的注意转换训练也在儿童群体中展现出较强的近迁移与远迁移潜力(Zhao et al., 2020)。然而，这类训练由于其高度程式化和低趣味性，往往在长期应用中面临儿童依从性下降的问题，且因静态训练模式可能引发久坐、肥胖等身体健康风险(Gu et al., 2019; Irak & Soylu, 2023)。因此，寻找一种既能激发儿童兴趣，又兼备有效性与生态适应性的干预方式，成为当前执行功能干预研究的核心议题。

体育运动作为一种自然嵌入日常生活的干预方式，近年来在认知神经科学中获得广泛关注。Meta 分析与多项实证研究已证实，规律性身体活动不仅可以提升儿童的体能水平，更对执行功能等核心认知能力具有显著影响(Chang et al., 2017; Contreras-Osorio et al., 2021; Festa et al., 2023; Formenti et al., 2021; Ishihara et al., 2017; Magistro et al., 2022; Shi et al., 2022)。但体育运动对执行功能的影响并非单一、稳定或线性的，其效果受运动持续时间、运动强度及认知参与等多种因素的调节。首先，根据运动时间的长短，可将其区分为急性运动和慢性运动。研究发现，与急性运动所带来的短暂效果相比，慢性运动似乎更能引发大脑结构和功能的可塑性变化，进而对执行功能产生长期的积极效应(Amatriain-Fernández et al., 2021)。其次，关于运动强度，“倒 U 型假说”认为，执行功能可能主要受益于中等强度运动(McMorris et al., 2016)。例如，Tsai 等人(2021)分别采用三种不同强度(低、中、高)的跑步机运动对儿童进行的干预研究表明，只有中等强度运动后的儿童在执行功能任务中的表现最佳。但亦有研究发现，一次高强度的足球运动同样可以显著提高儿童在执行功能任务上的表现(Lind et al., 2019)。这说明，虽然运动强度是影响运动干预效果的重要因素，但不同的运动干预措施也可能会导致其作用机制的差异。最后，关于认知参与，“认知刺激假说”认为，

认知参与性运动可能会通过预先激活用于控制高阶认知过程的相同脑区，从而促进执行功能的提升(Pesce, 2012)。Benzing 等人(2016)的实证研究进一步支持这一观点，该研究发现，在同等强度的体育运动条件下，运动中的认知参与度越高，对执行功能的改善效果越好。也就是说，运动中的认知参与可能才是影响运动干预效果的关键因素(Best, 2010)。然而，由于体育运动本身运动属性的限制，单纯的身体运动往往更侧重于体适能的训练和提升(Schmidt et al., 2015; Wang et al., 2019)，缺乏足够的认知参与和策略性思维的训练，对于认知功能的直接激活和挑战较为有限，难以在更为广泛的认知维度上促进执行功能的长久发展。

为了突破单一运动干预形式的局限，同时弥补其认知刺激的不足，近年来运动-认知联合训练(Motor-Cognitive Training)广受研究者关注。这种联合干预的手段通过整合体育运动和认知训练中的有益成分，旨在最大限度地提升个体的认知功能(Chartier et al., 2024)。实证研究表明，与单一的体育运动或认知训练相比，二者结合所产生的干预效果更为显著，尤其在执行功能提升方面表现出了更大的认知收益(Eggenberger et al., 2015; Lauenroth et al., 2016; Ji et al., 2020; Stojan & Voelcker-Rehage, 2019)。根据适应能力模型(Adaptive Capacity Model, ACM)，运动与认知训练的联合干预可能产生叠加效应和协同作用：运动通过促进神经元增殖和突触可塑性增强大脑可塑性，而认知训练则有助于新生神经元的存活和整合，从而共同促进神经网络的重塑与功能优化(Raichlen & Alexander, 2017)。此外，促进-引导模型(Facilitate-Guide Model)同样认为，在运动-认知联合训练中，运动主要起到促进神经可塑性变化的作用，而认知刺激则负责引导这些变化的方向和模式(Fabel et al., 2009; Huber et al., 2024)。两者结合不仅可以增加脑血流量和神经生长因子的分泌，还能通过改善脑结构和增强神经回路的功能连接，提升认知储备和大脑的适应能力(Castellote-Caballero et al., 2024)。这些机制共同解释了为何运动-认知联合训练会在提升执行功能方面展现出超越单一干预手段的优势。尽管如此，但现有的运动-认知联合干预措施仍存在一定局限。一方面，部分训练设计认知刺激过弱，难以有效激发高阶认知加工过程，如边走路边进行单词列表的编码或语言流利性训练(Ji et al., 2020; Schäefer & Schumacher, 2011)。另一方面，若认知任务过于复杂，则会导致认知负荷过高，降低儿童参与的积极性，如边进行运动任务边完成计算机化认知任务(Lauenroth et al., 2016; Lucia et al., 2023)。因此，如何在认知刺激与动机激励之间找到平衡点，是干预研究设计中的关键问题。

随着智能设备的普及，研究者逐渐认识到视频游戏训练(Video Game Training)在提升儿童执行功能方面的潜力。作为一种复杂的认知活动，视频游戏要求玩家协调多个认知过程，从而有效刺激认知可塑性，增加大脑的认知储备，并促进执行功能的发展(Anzeneder et al.,

2023; George et al., 2023；Gates et al., 2019; Yao et al., 2020)。但与此同时，视频游戏训练也面临两个核心争议：其一，干预效果是否具有持久性尚存疑问；其二，久坐不动及长期屏幕暴露可能引发健康问题(Irak & Soylu, 2023)。为了整合其优势并规避健康风险，研究者开始尝试将运动与视频游戏进行联合，即运动视频游戏训练(Sports Video Game/Exergaming Training)。该干预模式根植于具身认知理论(Embodied Cognition)，旨在充分发挥运动训练与视频游戏训练的优越性，强调认知并不是仅局限于大脑内部的信息处理过程，而是与身体运动、感觉反馈及环境的动态交互过程紧密相关(Foglia & Wilson, 2013)。这种多感官通道(如视觉、听觉、前庭觉和本体觉)的输入，不仅可以激活更为广泛的脑区，促进执行功能的多维发展，还可以提高认知加工的效率，增强个体在动态环境中的决策和执行控制能力(Herold et al., 2018; Huber et al., 2024)。在运动视频游戏训练中，根据运动任务与认知任务融合程度的不同，还可将其区分为融合式和结合式两种训练模式(Herold et al., 2018)。所谓融合式训练模式，是指将认知任务“嵌入”到运动任务中去，认知任务是成功完成运动任务的先决条件，强调运动与认知的高度整合，使个体同步提升认知控制和运动协调能力，即运动视频游戏训练。相比之下，结合式训练模式，是指将运动任务与认知任务并行进行，但两者在训练内容上互不关联，个体需要在进行运动训练的同时，独立完成视频游戏任务，即运动+视频游戏训练。尽管这两种训练模式在理论机制上具有区分度，但目前尚缺乏系统研究比较其在提升执行功能方面的差异性及作用机制。

综上所述，为填补以往研究中所存在的空白之处，本研究拟提出三个核心问题：

第一，以往研究主要将运动视频游戏训练作为老年人群体干预手段，其目的旨在延缓老年人的认知衰退或对其脑卒中问题进行治疗(Chartier et al., 2024)。相比之下，正处于认知发展关键期的儿童群体，是否同样会在运动视频游戏训练中获得较多的认知收益？

第二，在运动-认知联合训练的干预框架之下(Herold et al., 2018)，不同组合模式(融合式/结合式)的运动视频游戏训练是否会对儿童执行功能各成分产生不一样的影响路径？与此同时，这种差异性能否进一步扩展具身认知理论？

第三，运动强度(Lind et al., 2019; McMorris et al., 2016; Tsai et al., 2021)和认知参与(Benzing et al., 2016; Best, 2010; Pesce, 2012)作为影响运动干预效果的关键因素，二者在运动视频游戏训练中会发挥什么样的作用机制？

基于此，本研究拟通过两个干预实验系统回答上述提出的三个研究问题，深入探究运动视频游戏训练对儿童执行功能的影响及作用机制。实验 1 旨在比较不同组合模式(融合式和结合式)的运动视频游戏训练在不同干预时间节点上(四周、六周)的效果，我们假设，二者均

可提升执行功能，但融合式因其高度整合的特性在干预后期效果更优。实验 2 将在实验 1 的基础之上，进一步剖析运动强度与认知参与两个关键因素在运动视频游戏干预机制中的作用，探索其最优组合方式。我们预期，认知参与相较于运动强度对执行功能的促进作用更强，且这一优势会随着干预时间的延长而进一步扩大。为了更加清晰的呈现出本研究的整体思路，我们构建了本研究的研究框架图，详见图 1。

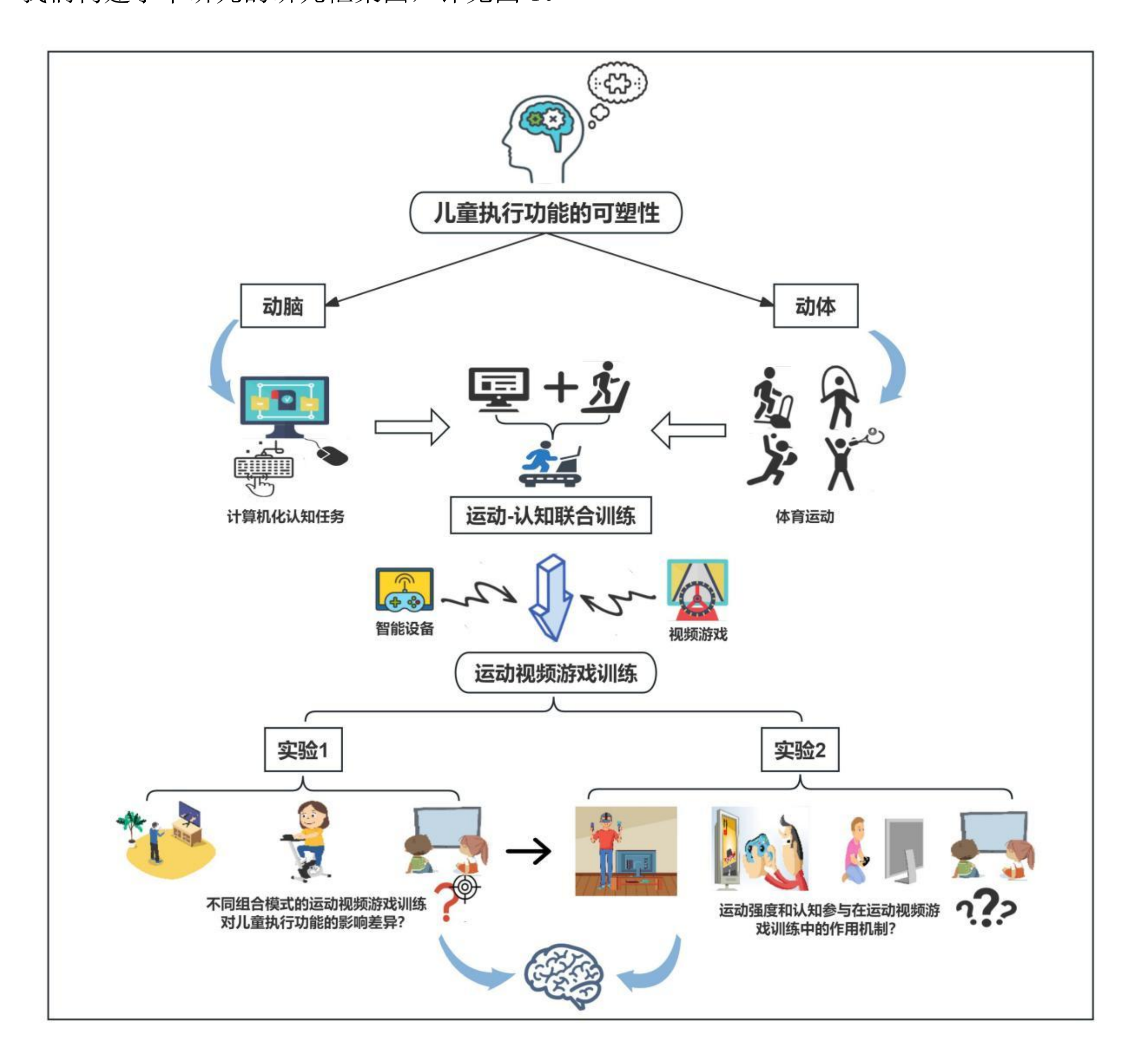


图 1　本研究的整体研究思路及框架图

2　实验 1：不同组合模式的运动视频游戏训练对儿童执行功能的影响

2.1　方法

2.1.1　被试

实验 1 在兰州某小学招募 93 名儿童，前测阶段有 3 名儿童未能完成全部任务测试，在训练开始前予以剔除，共计剩余 90 名被试，平均年龄为 11.34 ± 0.48 岁，通过随机抽样的方

式，将其分为三组。运动视频游戏组被试男 14 人，女 16 人；运动+视频游戏组被试男 13 人，女 17 人；控制组被试男 16 人，女 14 人。三组被试均为右利手，视力或矫正视力正常，无色盲，身体健康且无实验前 48 小时无出现失眠状况、大负荷运动，并且他们此前均未参加过类似实验。所有参与实验的儿童均得到了学校、家长和班主任老师的知情同意, 在实验结束后给予了一定的奖励。本研究经西北师范大学伦理委员会批准，审批号为 2024010。各组被试基本情况详见表 1。

表 1　实验一被试人口学变量

组别	总计	男	女	年龄(*M*±*SD*, 岁)
运动视频游戏组	30	14	16	11.43±0.50
运动+视频游戏组	30	13	17	11.33±0.48
控制组	30	16	14	11.27±0.45
总计	90	43	47	11.34±0.48

2.1.2　实验设计及流程

实验 1 采用 3(组别：运动视频游戏训练组、运动+视频游戏训练组和控制组)×3(测试阶段：前测、四周后测和六周后测)的混合实验设计，组别为被试间变量，测试阶段为被试内变量，因变量为执行功能四个子成分(干扰抑制、反应抑制、工作记忆和注意转换)任务的正确率或反应时。实验采用个别施测的方式，分别对各组被试进行为期 6 周，每周 3 次，每次 30 分钟的干预，并在每次干预前后进行 5 分钟的热身和肌肉放松活动，每位被试在实验期间不进行相关额外训练。

在签署知情同意书后，所有被试完成了前测任务，包括 Stroop 任务、Go/No-go 任务、数字刷新任务和注意转换任务。随后，所有被试参与为期 6 周、共计 18 次的干预训练。具体而言，运动视频游戏组的被试进行 Switch《健身环大冒险》游戏，运动+视频游戏组的被试进行功率自行车+地铁跑酷小游戏，而控制组则在相同的时间和地点观看健康视频《托马斯和他的朋友们》。在训练四周后，所有组别的被试均完成第一次后测，后测任务与前测一致。经过六周的干预训练后，所有组别再次完成第二次后测，后测任务同样与前测一致。最后，研究将比较运动视频游戏训练、运动+视频游戏训练和控制组在前测、4 周后测和 6 周后测中的得分差异，以评估各实验组训练的效果。实验 1 具体实施流程详见图 2。

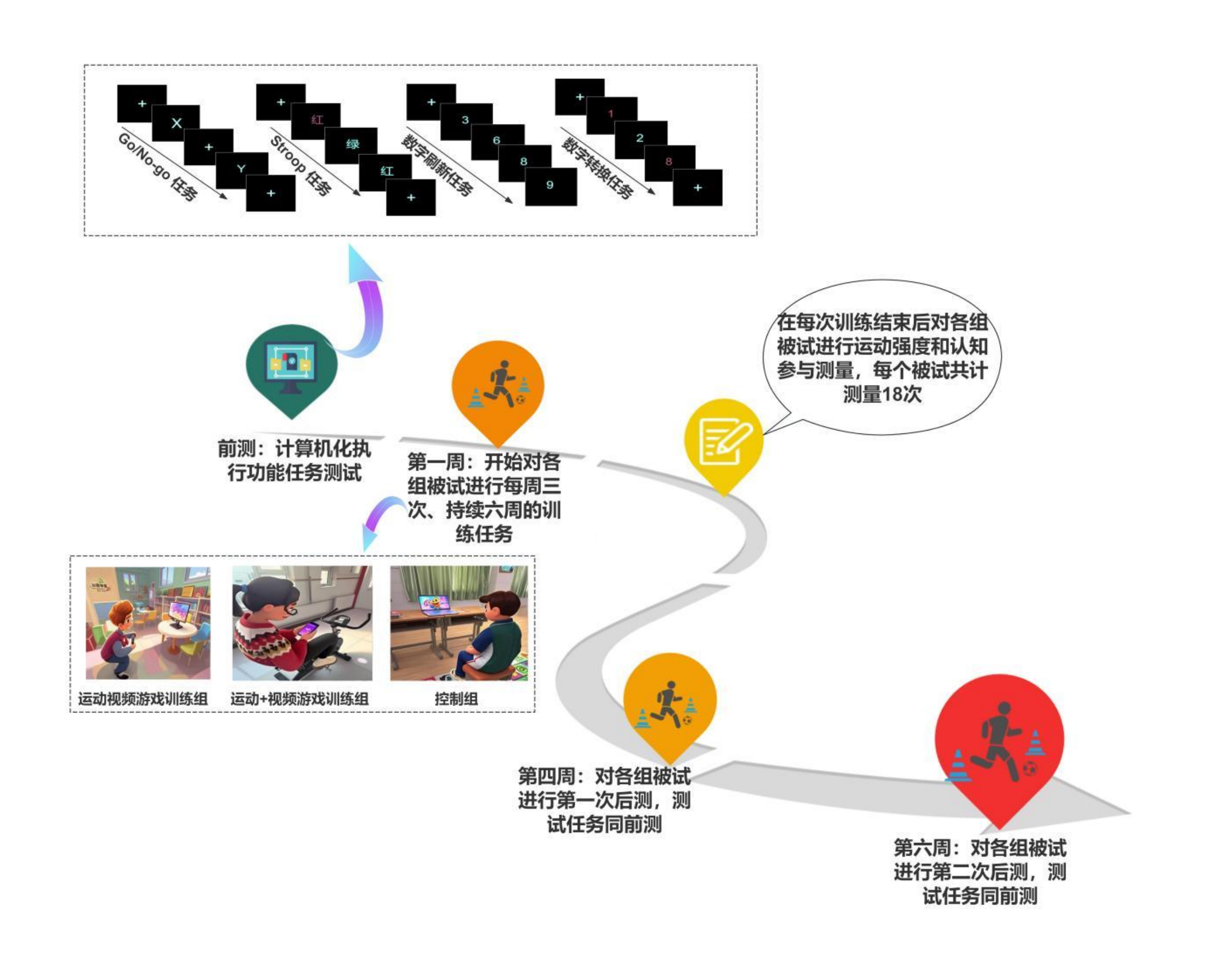


图 2　实验 1 实施流程图

2.1.3　前后测任务

(1) Stroop 任务

采用 Stroop 任务以评估儿童的干扰抑制能力(Zhao et al., 2018)。该实验使用两种颜色词汉字(“红”与“绿”)及一串无意义字符(“####”)作为实验材料，共包括三个实验条件：一致条件(颜色与词汇相匹配的“红”字与“绿”字)、不一致条件(颜色与词汇不匹配的“红”字与“绿”字)以及中性条件(颜色呈现于无意义字符“####”上)。每个实验块启始，屏幕中央将展示一个持续 500 毫秒(ms)的注视点“+”，随后是 1000ms 的空白屏幕，接着是 1500ms 的刺激呈现时间，之后屏幕再次空白，进入下一个试次。实验共包括 1 个练习实验块和 3 个正式实验块，练习实验块旨在使被试熟悉实验流程，只有当被试在练习实验块的正确率达到或超过 85%时，才能进入正式实验阶段。在正式实验的每个实验块中，三种条件(一致、不一致、中性)各包括 12 个试次，每个块总共 36 个试次，整个实验共计 108 个试次。被试需根据呈现的汉字或字符颜色，通过按下相应的键盘按钮(红色为“F”键，绿色为“J”键)作出反应。该实验主要记录被试在不一致条件、一致条件及中性条件下的平均反应时，干扰效应的计算方法为不一致条件与中性条件下的平均反应时之差。

(2) Go/No-go 任务

在本研究中，Go/No-go 任务被用于评估儿童的反应抑制能力(Zhao et al., 2018)。该实验任务主要包含两个实验条件，即 Go 实验条件和 No-go 实验条件，Go 与 No-go 刺激的呈现比例均为 50%。实验设计包括两个练习实验块(每个实验块包含 10 个 Go 试次和 10 个 No-go 试次)以及四个正式实验块(每个实验块包含 50 个 Go 试次和 50 个 No-go 试次)。在四个正式实验实验块中，两个实验块设置为字母 X 呈现时按“J”键(Go 试次)，字母 Y 呈现时不作响应(No-go 试次)，另外两个实验块的设置则相反(字母 Y 呈现时按“J”键)。每种设置下都包括一个练习实验块，旨在使被试熟悉实验流程，被试只有在练习实验块中的正确率达到或超过 85%时，才能进入正式实验阶段。每个实验块的开始，屏幕中央将展示一个持续 1000 毫秒(ms)的注视点“+”，随后是 600ms 的刺激展示时间，刺激结束后屏幕将变为空白，进入下一个试次。该实验主要记录被试在 Go 条件或 No-go 条件下的平均反应时和正确率，由于小学高年级阶段儿童的反应抑制能力已经发展较为成熟，因而本研究主要采用 No-go 条件下的平均正确率作为儿童反应抑制能力的衡量指标。

(3) 数字刷新任务

采用数字刷新任务来考察儿童在工作记忆中信息刷新的能力(Zhao et al., 2018)。该任务分为简单任务(刷新 1750 任务)和复杂任务(刷新 750 任务)两个级别，二者的主要区别在于数字呈现时间的长短。在具体而言，简单任务中，每个数字的呈现时间为 1750 毫秒(ms)，而在复杂任务中，每个数字的呈现时间缩短至 750ms。简单任务和复杂任务均包含一个练习实验块，共 8 个试次，每种长度各出现两次，以及两个正式实验实验块，每个实验块 12 个试次，每种长度随机出现三次。在任务过程中，被试将被随机展示一系列 0 至 9 的数字，系列长度依次升高为 5、7、9 和 11。在每种系列长度出现时，被试需要持续复述呈现的数字，并记住每个系列中最后出现的三个数字，例如，如果屏幕依次展示数字 9、8、5、2、1、3，被试需记忆并复述从“9”逐步更新至“213”，并在屏幕上的黑色框内输入最后三个数字后按空格键以进入下一个系列。该实验主要记录被试在简单或复杂任务条件下的平均正确率，本研究将简单和复杂任务的平均正确率作为衡量儿童工作记忆刷新能力的指标。

(4) 数字转换任务

本研究采用了数字转换任务，旨在评估儿童的注意转换能力(Zhao et al., 2018)。在此任务中，首先呈现出 1400(ms)的注视点，随后被试会看到 1 至 9 的数字(5 除外)，当数字呈现颜色为红色时，需要判断该数字是比 5 大还是比 5 小(任务 A)；当数字呈现颜色为蓝色时，需要判断该数字是奇数还是偶数(任务 B)。实验设计共包括两种实验条件：即执行单一任务

(仅进行任务 A 或任务 B)和执行混合任务(同时进行任务 A 和 B)。任务 A 将红色数字与 5 进行比较，大于 5 时按“A”键，小于 5 时按“L”键；任务 B 对蓝色数字进行奇偶性判断，奇数时按“A”键，偶数时按“L”键。在正式实验前，设置了两个单一任务的练习实验块以帮助被试熟悉实验流程，只有在被试的正确率达到 75%或以上时，才能进入正式实验阶段。正式实验由 20 个实验块，共计 250 个试次构成，其中单一任务实验块和混合任务实验块均有 10 个，这些实验块会随机呈现，每个单一任务实验块包含 8 个试次，每个混合任务实验块包含 17 个试次。该任务的统计指标为单一试次、非转换试次和转换试次的平均反应时，其中，转换代价作为衡量儿童注意转换能力的重要指标，其计算方式为转换试次的平均反应时减去非转换试次的平均反应时。

2.1.4 训练任务

为保证运动视频游戏训练组与运动+视频游戏训练组中运动和认知任务的同质性，我们采用情境、难度类似的 switch《健身环大冒险》和功率自行车+地铁跑酷小游戏的形式对干预组进行训练。具体操纵如下：

运动视频游戏训练组：采用任天堂 switch《健身环大冒险》游戏对被试进行干预训练。该游戏共分为 6 个模块，分别是冒险、轻松、自定义、背景执行模式、节奏游戏以及小知识清单。本实验选择了自定义模块对被试进行训练，玩家可以根据自身运动能力和偏好选择不同动作并进行动作的自定义组合，游戏中需要判断障碍物种类例如浮木、石头等，通过挤拉健身环使儿童不停地跑、跳、深蹲等对不同障碍物做出相应的身体姿势，来控制游戏中的人物前进，同时沿途还需要收集藏在各个角落的金币，全程都需要进行思考和决策。详见附图 S1。

运动+视频游戏训练组：采用的是骑功率自行车+地铁跑酷小游戏的方式对被试进行干预训练，要求被试一边骑有氧动感单车一边玩地铁跑酷小游戏，运动任务和认知任务分开同时进行。游戏的主线从三条铁轨上展开，玩家要以孩子 Jake 的身份不断在铁轨中及时穿梭来躲避列车，同时收集金币，注意躲避警察及猎狗的追捕。详见附图 S2。

控制组：观看健康动画片《托马斯和他的朋友们》。详见附图 S3。

2.1.5 自变量操纵

为确保实验操纵的有效性，我们在整个实验过程中对各组被试的运动强度与认知参与都进了一定程度的控制，具体控制方法如下：

运动强度控制：在实验过程中，被试佩戴 PolarRS400 心率绑带，记录其在训练期间的平均心率，每 5 分钟评估一次心率，确保被试维持在中等强度运动(最大心率的 64~76%)。

同时，在每次干预结束后，采用主观用力感量表(RPE; Borg, 1982)对被试所感受到的运动强度状态进行测量，该问卷的评分范围为 6~20 分，其中，中等强度运动的评分范围是 11~13 分之间。

认知参与控制：在实验结束后，采用 Best (2012)所编制的认知参与问卷考察被试在训练期间的认知参与状况。该问卷共 6 道选择题, 每道题只有两个选项，例如“你更喜欢参加我今天跟你做的这个活动还是在操场上玩你喜欢的游戏？”选择“今天做的活动”得 1 分, 否则 0 分，评分范围为 0~6 分。

2.1.6 数据分析

使用 SPSS 26.0 进行数据分析，通过重复测量方差分析方法检验各实验组儿童执行功能各子成分的提升效果。为使实验结果更加直观，我们采用 Python 3.10.11 对全部数据分析结果进行了可视化呈现。

2.2 结果

2.2.1 实验操纵有效性分析

为了检验三个实验组干预方式的有效性，我们参考以往研究者对于运动强度(RPE; Borg, 1982)和认知参与(Best, 2012)的控制方法，在每次干预结束后对被试的运动强度和认知参与状况进行问卷测量，每个被试共计测量 18 次，各实验组得分详见表 2。

表 2 实验 1 操纵有效性分析

组别	运动强度		认知参与	
	M	*SD*	*M*	*SD*
运动视频游戏训练组	11.278	1.087	4.476	0.657
运动+视频游戏训练组	11.250	1.039	4.407	0.682
控制组	7.206	1.178	1.293	0.965
P	<0.001***		<0.001***	

对于运动强度来说，三个实验组的得分存在显著差异，$P < 0.001$。事后检验结果显示，运动视频游戏训练组和运动+视频游戏训练组的得分与控制组的得分均存在显著差异($Ps < 0.001$)，而运动视频游戏训练组与运动+视频游戏训练组之间的得分并不存在显著差异($P > 0.05$)。这说明，运动强度在两个干预实验组之间得到了良好的控制，表明干预有效。详见图 3。

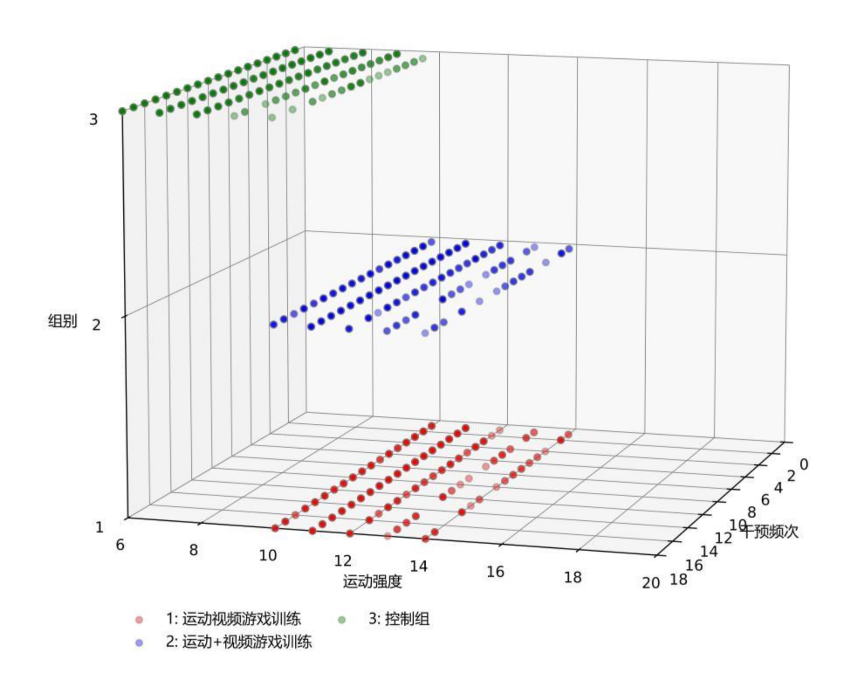


图 3　实验 1 各组被试每次干预后运动强度得分的可视化分布

对于认知参与来说，三个实验组的得分同样存在显著差异，$P < 0.001$。事后检验结果显示，运动视频游戏训练组和运动+视频游戏训练组的得分与控制组的得分均存在显著差异($Ps < 0.001$)，而运动视频游戏训练组与运动+视频游戏训练组之间的得分并不存在显著差异($P > 0.05$)。这说明，认知参与在两个干预实验组之间同样得到了良好的控制，表明干预有效。详见图 4。

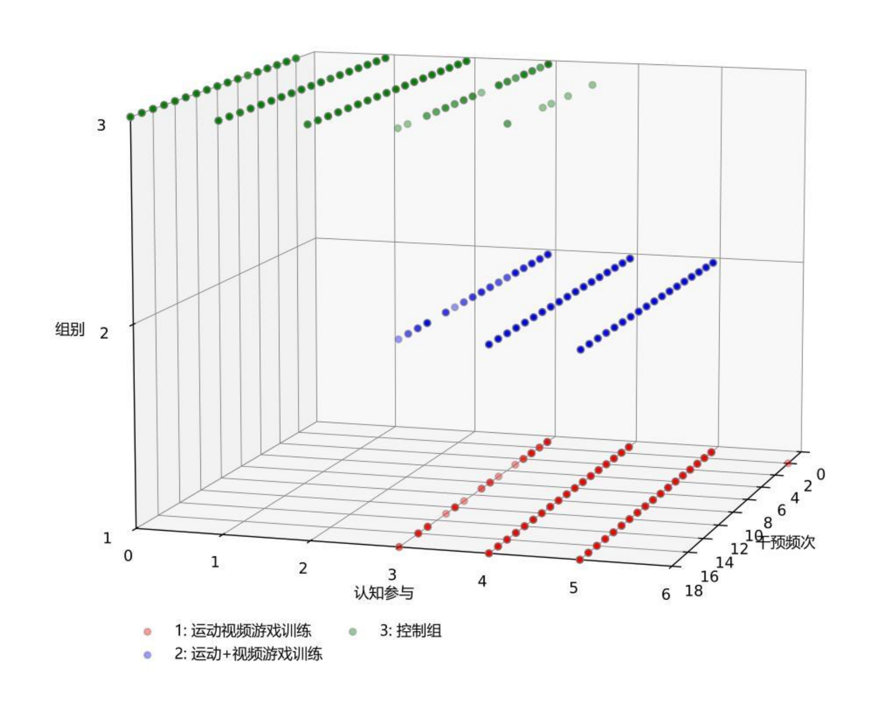


图 4　实验 1 各组被试每次干预后认知参与得分的可视化分布

2.2.2　儿童执行功能各成分基线水平的描述统计与差异检验

在实验一开始前，我们先对运动视频游戏组、运动+视频游戏组和控制组三组被试执行功能的基线水平进行测试，采用方差分析对三组被试的成绩进行差异检验，以排除基线执行功能水平对训练效果的影响。结果显示，三组被试执行功能各成分的基线水平均不存在显著差异($Ps > 0.05$)，说明基线各组控制有效，详见附表 S1。

2.2.3　各组训练前后儿童执行功能各成分的提升效果

为更清晰的观察到各组训练前后儿童执行功能各成分的表现，我们对运动视频游戏组、运动+视频游戏组和控制组在前测、四周后测和六周后测的成绩进行了描述统计，详见附表 S2。在描述统计的基础之上，我们进一步采用 3(测试阶段：前测、四周后测、六周后测)×3(组别：运动视频游戏训练组、运动+视频游戏训练组、控制组)的重复测量方差分析对儿童在执行功能各任务上的表现进行分析，其中，测试阶段为被试内变量，组别为被试间变量，结果详见表 3。

表 3　各组干预前后儿童执行功能各成分的提升效果

变量	任务指标	因素	*dfs*	*F*	*P*	η_p^2
干扰抑制	Stroop 任务 干扰效应(ms)	测试阶段	(2,87)	1.484	0.230	0.017
		组别	(2,87)	0.952	0.390	0.021
		测试阶段×组别	(2,87)	0.497	0.738	0.011
反应抑制	Go/No-go 任务 No-go 正确率	测试阶段	(2,87)	7.944	**<0.001*** **	0.084
		组别	(2,87)	4.095	**0.020***	0.086
		测试阶段×组别	(2,87)	0.991	0.414	0.022
工作记忆刷新	数字刷新任务 平均正确率	测试阶段	(2,87)	22.879	**<0.001*** **	0.208
		组别	(2,87)	12.585	**<0.001*** **	0.224
		测试阶段×组别	(2,87)	3.426	**0.010***	0.073
注意转换	注意转换任务 转换代价(ms)	测试阶段	(2,87)	8.454	**<0.001*** **	0.089
		组别	(2,87)	2.890	0.061	0.062
		测试阶段×组别	(2,87)	0.678	0.595	0.015

对于干扰抑制而言，结果显示，测试阶段主效应不显著，$F(2, 87) = 1.484$，$p = 0.230$，$\eta_p^2 = 0.017$；组别主效应不显著，$F(2, 87) = 0.952$，$p = 0.390$，$\eta_p^2 = 0.021$；测试阶段×组别的交互作用不显著，$F(2, 87) = 0.497$，$p = 0.738$，$\eta_p^2 = 0.011$。这表明，经过长期干预后，儿童

的干扰抑制能力并未得到显著提升。详见图 5。

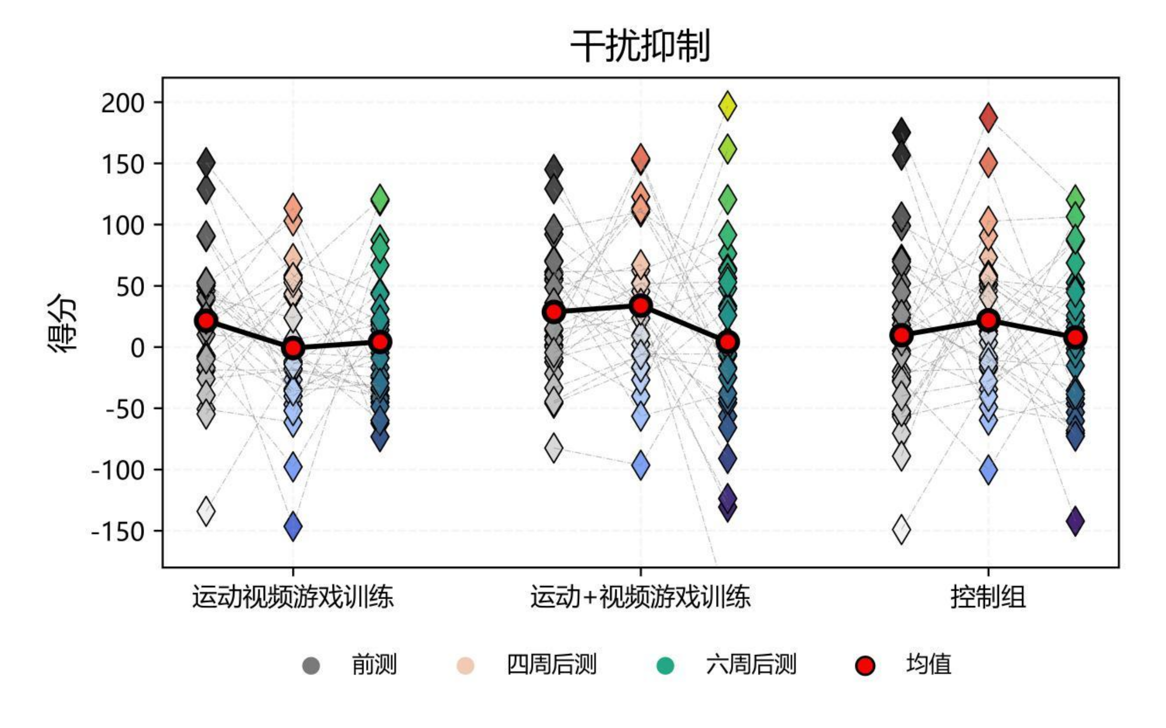


图 5　三个实验组训练前后干扰抑制得分的变化趋势

对于反应抑制而言，结果显示，测试阶段主效应显著，$F(2, 87) = 1.484$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.084$，四周后测($M = 0.869$, $SD = 0.012$)和六周后测($M = 0.870$, $SD = 0.016$)的成绩均显著高于前测($M = 0.800$, $SD = 0.017$)；组别主效应显著，$F(2, 87) = 4.095$，$p < 0.05$，$\eta_p^2 = 0.086$，运动视频游戏组($M = 0.884$, $SD = 0.016$)成绩显著高于控制组($M = 0.824$, $SD = 0.016$)，相比之下，运动+视频游戏组的成绩与控制组不存在显著差异($P > 0.05$)；测试阶段×组别的交互作用不显著，$F(2, 87) = 0.991$，$p = 0.414$，$\eta_p^2 = 0.022$。这说明，经过长期训练后，仅运动视频游戏组的反应抑制能力得到了显著提升。详见图 6。

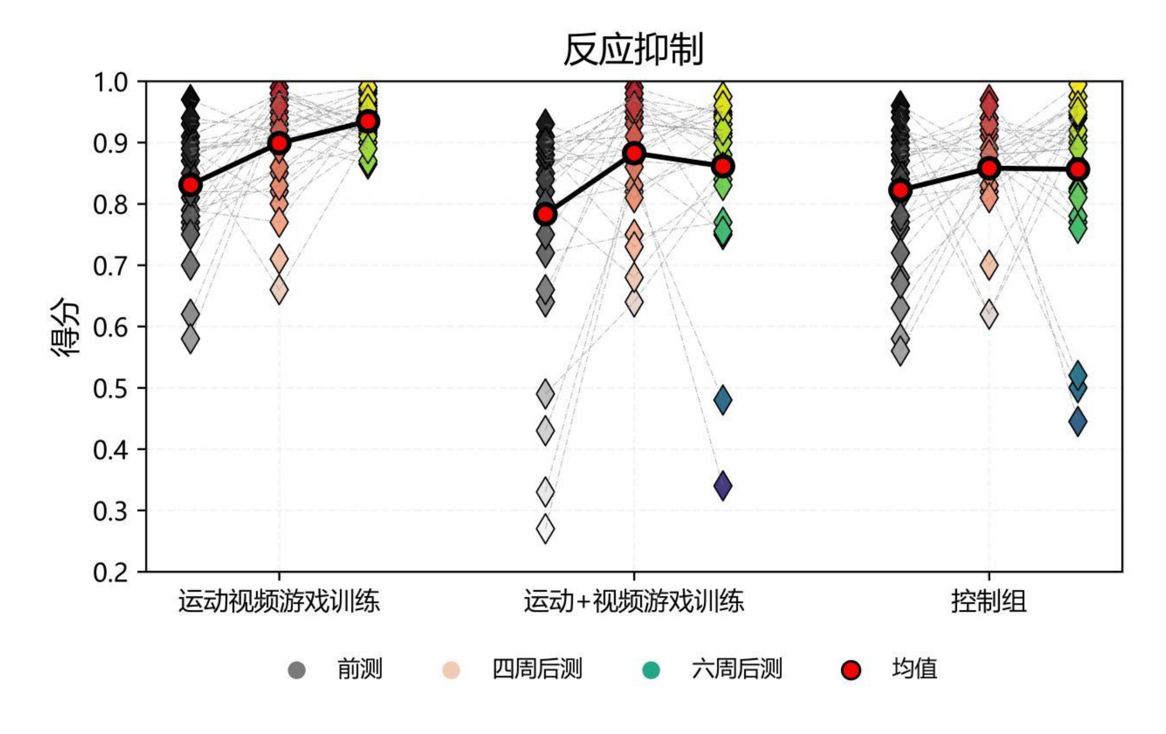


图 6　三个实验组训练前后反应抑制得分的变化趋势

对于工作记忆刷新而言，结果显示，测试阶段主效应显著，$F(2, 87) = 22.879$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.208$，四周后测($M = 0.651$, $SD = 0.020$)和六周后测($M = 0.664$, $SD = 0.017$)的成绩均显著高于前测($M = 0.515$, $SD = 0.015$)；组别主效应显著，$F(2, 87) = 12.585$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.224$，运动视频游戏组($M = 0.666$, $SD = 0.017$)和运动+视频游戏组($M = 0.619$, $SD = 0.017$)的成绩均显著高于控制组($M = 0.545$, $SD = 0.017$)；测试阶段×组别的交互作用显著，$F(2, 87) = 3.426$，$p < 0.05$，$\eta_p^2 = 0.073$。进一步简单效应分析发现，在四周后测条件下，运动视频游戏组($M = 0.702$, $SD = 0.034$)和运动+视频游戏组($M = 0.685$, $SD = 0.034$)的成绩均显著高于控制组($M = 0.565$, $SD = 0.034$)，$F(2, 87) = 4.867$，$p < 0.05$，$\eta_p^2 = 0.101$。在六周后测条件下，运动视频游戏组($M = 0.778$, $SD = 0.029$)的成绩显著高于运动+视频游戏组($M = 0.617$, $SD = 0.029$)和控制组($M = 0.597$, $SD = 0.029$)，$F(2, 87) = 11.708$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.212$。这说明，在干预四周后，运动视频游戏组和运动+视频游戏组之间并未出现明显差异，二者的工作记忆刷新成绩均高于控制组，但随着训练时间的延续，在干预六周后，运动视频游戏组的成绩开始高于运动+视频游戏组。在运动视频游戏训练条件下，四周后测($M = 0.702$, $SD = 0.034$)和六周后测($M = 0.778$, $SD = 0.029$)的成绩均显著高于前测($M = 0.516$, $SD = 0.026$)，$F(2, 87) = 21.088$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.329$。在运动+视频游戏训练条件下，仅四周后测($M = 0.685$, $SD = 0.034$)的成绩显著高于前测($M = 0.555$, $SD = 0.026$)，$F(2, 87) = 4.889$，$p < 0.05$，$\eta_p^2 = 0.102$。这说明，随着训练时间的延续，运动视频游戏组的工作记忆刷新成绩持续提高，而运动+视频游戏组的成绩仅

在四周后出现了显著提升，之后并未出现明显提高。这些结果表明，与运动+视频游戏训练相比，运动视频游戏训练更有利于提高儿童的工作记忆刷新能力。详见图 7。

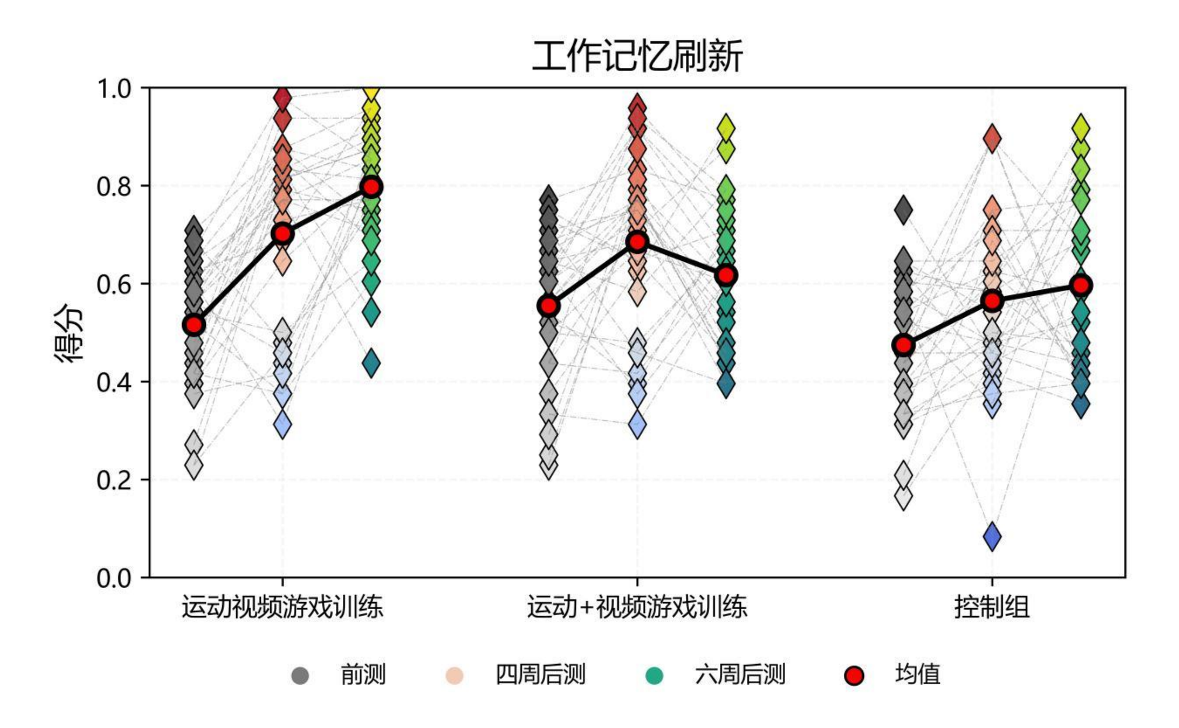


图 7　三个实验组训练前后工作记忆刷新得分的变化趋势

对于注意转换而言，结果显示，测试阶段主效应显著，$F(2, 87) = 8.454$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.089$，六周后测($M = 45.487, SD = 13.661$)的成绩均显著高于前测($M = 146.275, SD = 22.769$)和四周后测($M = 115.775, SD = 16.141$)；组别主效应不显著，$F(2, 87) = 2.890$，$p = 0.061$，$\eta_p^2 = 0.062$；测试阶段×组别的交互作用不显著，$F(2, 87) = 0.678$，$p = 0.595$，$\eta_p^2 = 0.015$。这说明，经过长期训练后，各实验组的注意转换能力均得到了显著提升，但由于组别主效应不显著，无法说明究竟哪一组的提升效果最好。详见图 8。

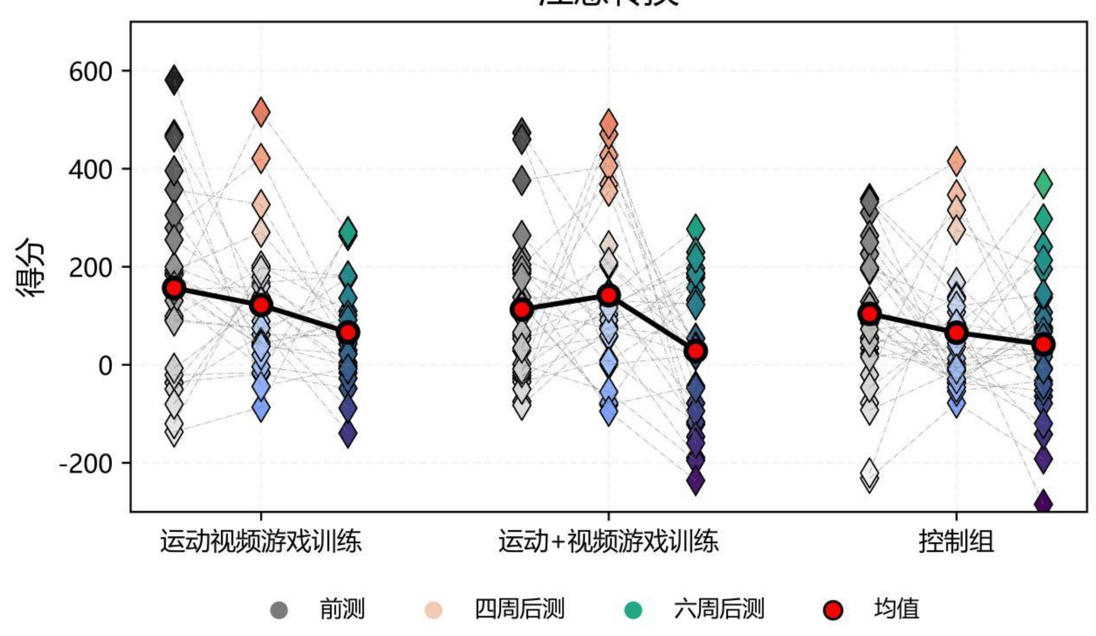


图 8　三个实验组训练前后注意转换得分的变化趋势

3　实验 2：运动视频游戏训练促进儿童的执行功能：运动强度和认知参与的作用

3.1　方法

3.1.1　被试

实验 2 在兰州某小学招募 124 名儿童，训练期间由于个人原因中途退出 4 名，共计剩余 120 名被试，平均年龄为 12.44 ± 0.61 岁，通过随机抽样的方式，将其分为四组。高运动强度+高认知参与组被试男 17 人，女 13 人；低运动强度+高认知参与组被试男 15 人，女 15 人；高运动强度+低认知参与组被试男 14 人，女 16 人；低运动强度+低认知参与组被试男 18 人，女 12 人。四组被试均为右利手，视力或矫正视力正常，无色盲，身体健康且无实验前 48 小时无出现失眠状况、大负荷运动，并且他们此前均未参加过类似实验。所有参与实验的儿童均得到了学校、家长和班主任老师的知情同意，在实验结束后给予了一定的奖励。各组被试基本情况详见表 4。

表 4　实验 2 被试人口学变量

组别	总计	男	女	年龄(*M*±*SD*，岁)
高运动强度+高认知参与组	30	17	13	12.30±0.54
低运动强度+高认知参与组	30	15	15	12.53±0.68
高运动强度+低认知参与组	30	14	16	12.50±0.57
低运动强度+低认知参与组	30	18	12	12.43±0.63

总计	120	64	56	12.44±0.61

3.1.2 实验设计及流程

实验 2 采用 2(运动强度：高、低)×2(认知参与：高、低)×3(测试阶段：前测、四周后测和六周后测)的混合实验设计，运动强度和认知参与为被试间变量，测试阶段为被试内变量，因变量为 Go/No-go 任务和数字刷新任务的正确率。实验采用个别施测的方式，分别对各组被试进行为期 6 周，每周 3 次，每次 30 分钟的干预，并在每次干预前后进行 5 分钟的热身和肌肉放松活动，每位被试在实验期间不进行相关额外训练。

在签订知情同意书后，所有被试均完成了前测任务：Go/No-go 任务和数字刷新任务。之后对被试进行为期 6 周共计 18 次的干预训练，高运动强度+高认知参与组的被试进行 Switch《健身环大冒险》游戏，低运动强度+高认知参与组的被试进行《超级马里奥》游戏，高运动强度+低认知参与组的被试进行《舞动全开》游戏，低运动强度+低认知参与组的被试观看健康动画视频《托马斯和他的朋友们》。在训练四周后，对各组被试进行第一次后测，后测任务与前测一致。在训练 6 周后，对各组被试进行第二次后测，后测任务与前测一致。最后，深入考察运动强度和认知参与在运动视频游戏训练中所起的作用，进一步明晰运动视频游戏训练促进儿童执行功能改善的机制。实验 2 具体实施流程详见图 9。

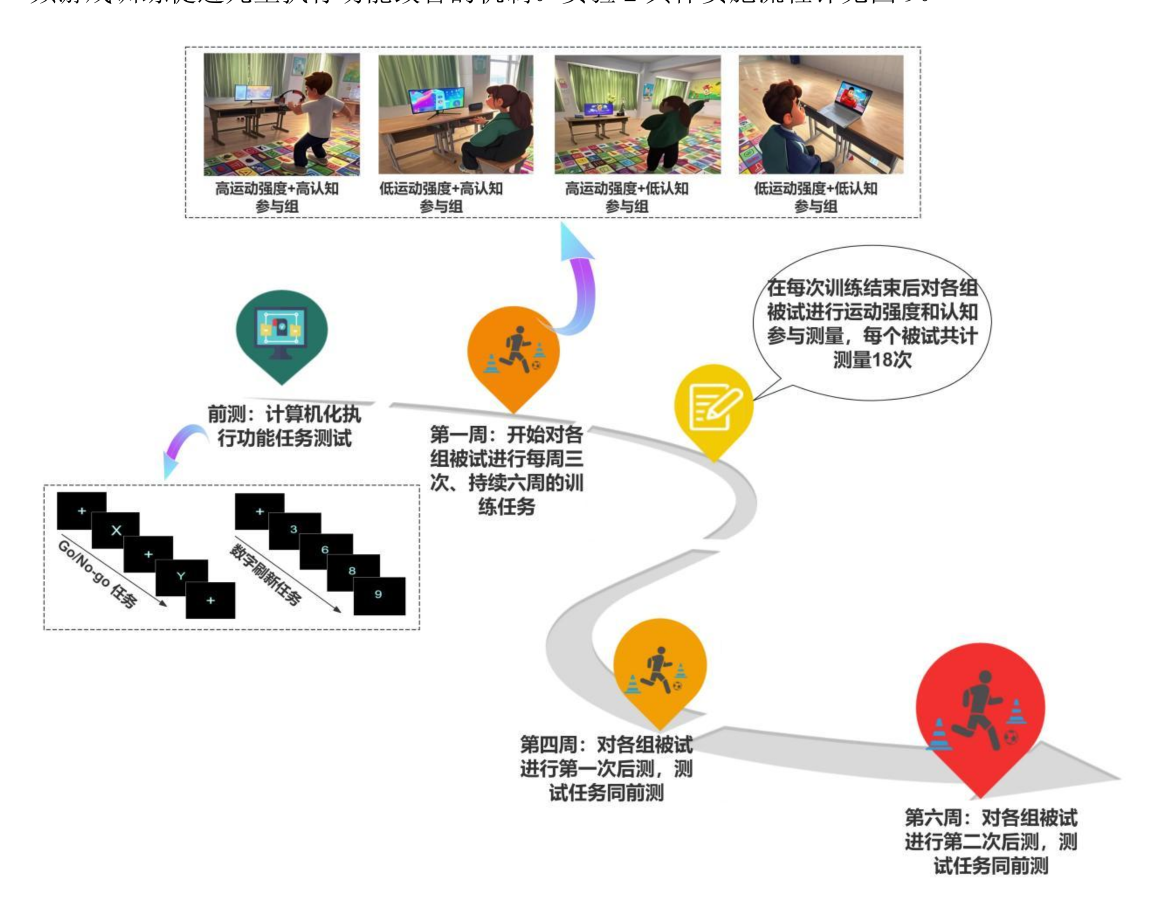


图 9　实验 2 实施流程图

3.1.3　前后测任务

(1) Go/No-go 任务

在本研究中，Go/No-go 任务被用于评估儿童的反应抑制能力(Zhao et al., 2018)。该实验任务主要包含两个实验条件，即 Go 实验条件和 No-go 实验条件，Go 与 No-go 刺激的呈现比例均为 50%。实验设计包括两个练习实验块(每个实验块包含 10 个 Go 试次和 10 个 No-go 试次)以及四个正式实验块(每个实验块包含 50 个 Go 试次和 50 个 No-go 试次)。在四个正式实验实验块中，两个实验块设置为字母 X 呈现时按“J”键(Go 试次)，字母 Y 呈现时不作响应(No-go 试次)，另外两个实验块的设置则相反(字母 Y 呈现时按“J”键)。每种设置下都包括一个练习实验块，旨在使被试熟悉实验流程，被试只有在练习实验块中的正确率达到或超过 85%时，才能进入正式实验阶段。每个实验块的开始，屏幕中央将展示一个持续 1000 毫秒(ms)的注视点“+”，随后是 600ms 的刺激展示时间，刺激结束后屏幕将变为空白，进入下一个试次。该实验主要记录被试在 Go 条件或 No-go 条件下的平均反应时和正确率，由于小学高年级阶段儿童的反应抑制能力已经发展较为成熟，因而本研究主要采用 No-go 条件下的平均正确率作为儿童反应抑制能力的衡量指标。

(2) 数字刷新任务

采用数字刷新任务来考察儿童在工作记忆中信息刷新的能力(Zhao et al., 2018)。该任务分为简单任务(刷新 1750 任务)和复杂任务(刷新 750 任务)两个级别，二者的主要区别在于数字呈现时间的长短。在具体而言，简单任务中，每个数字的呈现时间为 1750 毫秒(ms)，而在复杂任务中，每个数字的呈现时间缩短至 750ms。简单任务和复杂任务均包含一个练习实验块，共 8 个试次，每种长度各出现两次，以及两个正式实验实验块，每个实验块 12 个试次，每种长度随机出现三次。在任务过程中，被试将被随机展示一系列 0 至 9 的数字，系列长度依次升高为 5、7、9 和 11。在每种系列长度出现时，被试需要持续复述呈现的数字，并记住每个系列中最后出现的三个数字，例如，如果屏幕依次展示数字 9、8、5、2、1、3，被试需记忆并复述从“9”逐步更新至“213”，并在屏幕上的黑色框内输入最后三个数字后按空格键以进入下一个系列。该实验主要记录被试在简单或复杂任务条件下的平均正确率，本研究将简单和复杂任务的平均正确率作为衡量儿童工作记忆刷新能力的指标。

3.1.4　训练任务

高运动强度+高认知参与组：使用任天堂 Switch 游戏机与健身环套装，游戏为《健身环大冒险》。本研究选择了冒险模块对被试进行训练，高运动强度体现在被试需要不停地跑、

跳来控制游戏中的人物前进与躲避障碍物，健身环可拉可挤，能上能下，可以做深蹲、卷腹等。高认知参与则体现在游戏中需要判断障碍物种类例如浮木、石头等，对应不同障碍物做出相应的身体姿势，并判断障碍物出现位置，及时作出反应，同时沿途还需要收集藏在各个角落的金币，全程都需要进行思考和决策。详见附图 S4。

低运动强度+高认知参与组：使用任天堂 Switch 游戏机进行《超级马里奥》游戏。低运动强度体现在儿童静坐在屏幕前通过手柄完成活动。高认知参与体现在儿童需要躲避各种障碍物，障碍物会发生变化，比如砖、会移动的乌龟，并且还需要获得金币同时获得道具，注意场景的变化，需要高度集中注意力。详见附图 S5。

高运动强度+低认知参与组：使用任天堂 Switch 游戏机进行《舞动全开》游戏，高运动强度体现在精确度节奏感较强，需要全身参与活动。低认知参与体现在玩法较简单，只需要按照游戏里面角色的动作进行舞蹈演示。详见附图 S6。

低运动强度+低认知参与组：儿童坐在电脑前观看《托马斯和他的朋友们》动画片，儿童在距离电脑 1.5 米左右坐好。儿童只需要静坐在屏幕前观看视频，该活动不需要儿童运动和思考，因此，该活动为低运动强度和低认知参与。详见附图 S7。

3.1.5 自变量操纵

为确保实验操纵的有效性，我们在整个实验过程中对各组被试的运动强度与认知参与都进了一定程度的控制，具体控制方法如下：

运动强度控制：在实验过程中，被试佩戴 PolarRS400 心率绑带，记录其在训练期间的平均心率，每 5 分钟评估一次心率，确保两个“高运动强度”组以及两个“低运动强度”组被试的平均心率基本一致。同时，在每次干预结束后，采用主观用力感量表(RPE, Borg, 1982)对被试所感受到的运动强度状态进行测量，该问卷的评分范围为 6~20 分。

认知参与控制：在实验结束后，采用 Best (2012)所编制的认知参与问卷考察被试在训练期间的认知参与状况。该问卷共 6 道选择题, 每道题只有两个选项，例如“你更喜欢参加我今天跟你做的这个活动还是在操场上玩你喜欢的游戏？”选择“今天做的活动”得 1 分, 否则 0 分，评分范围为 0~6 分。

3.2 结果

3.2.1 实验操纵有效性分析

为了考察各实验组中运动强度和认知参与操纵的有效性，我们同样参考以往研究者对于运动强度(RPE; Borg, 1982)和认知参与(Best, 2012)的控制方法，在每次干预结束后对被试的运动强度和认知参与状况进行问卷测量，每个被试共计测量 18 次，各实验组得分详见表 5。

表 5 实验 2 操纵有效性分析

组别	运动强度		认知参与	
	M	*SD*	*M*	*SD*
高运动强度+高认知参与组	15.976	0.634	4.643	0.480
低运动强度+高认知参与组	7.615	0.600	4.654	0.476
高运动强度+低认知参与组	15.944	1.011	1.352	0.740
低运动强度+低认知参与组	7.565	0.622	1.361	0.62
P	<0.001***		<0.001***	

对于运动强度来说，四个实验组的得分存在显著差异，$P < 0.001$。事后检验结果显示，两个“高运动强度”组的得分显著高于两个“低运动强度”组($Ps < 0.001$)，相比之下，两个“高运动强度”组之间的得分并不存在显著差异($P > 0.05$)，且两个“低运动强度”组之间的得分同样不存在显著差异($P > 0.05$)。这说明，运动强度在各实验组之间的控制达到了预期要求，表明自变量操纵有效。详见图 10。

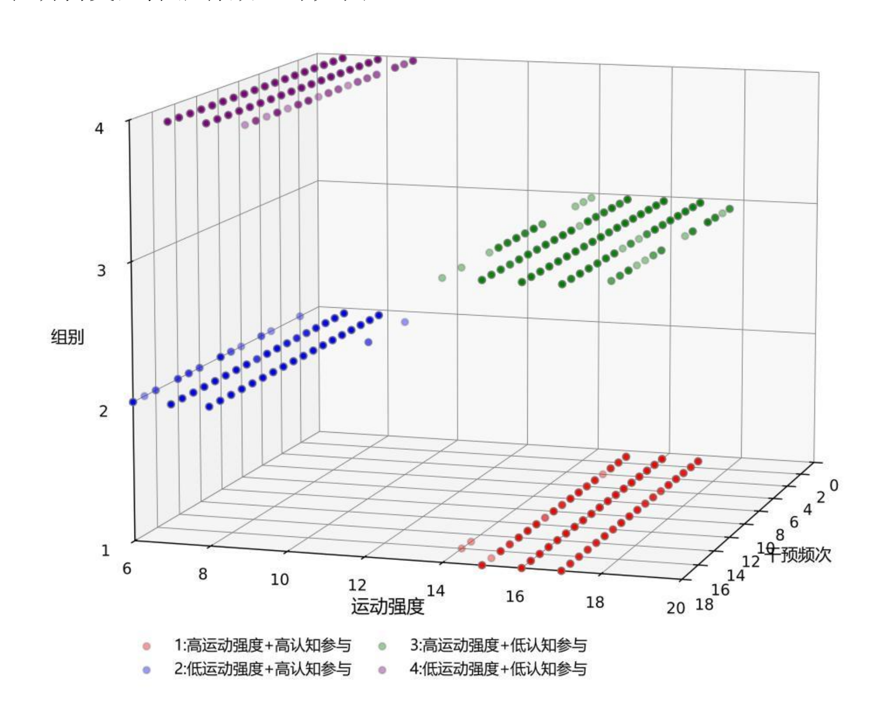


图 10　实验 2 各组被试每次干预后运动强度得分的可视化分布

对于认知参与来说，四个实验组的得分存在显著差异，$P < 0.001$。事后检验结果显示，两个“高认知参与”组的得分显著高于两个“低认知参与”组($Ps < 0.001$)，相比之下，两个“高认知参与”组之间的得分并不存在显著差异($P > 0.05$)，且两个“低认知参与”组之间的得分同样不存在显著差异($P > 0.05$)。这说明，认知参与在各实验组之间的控制达到了预期要求，表明自变量操纵有效。详见图 11。

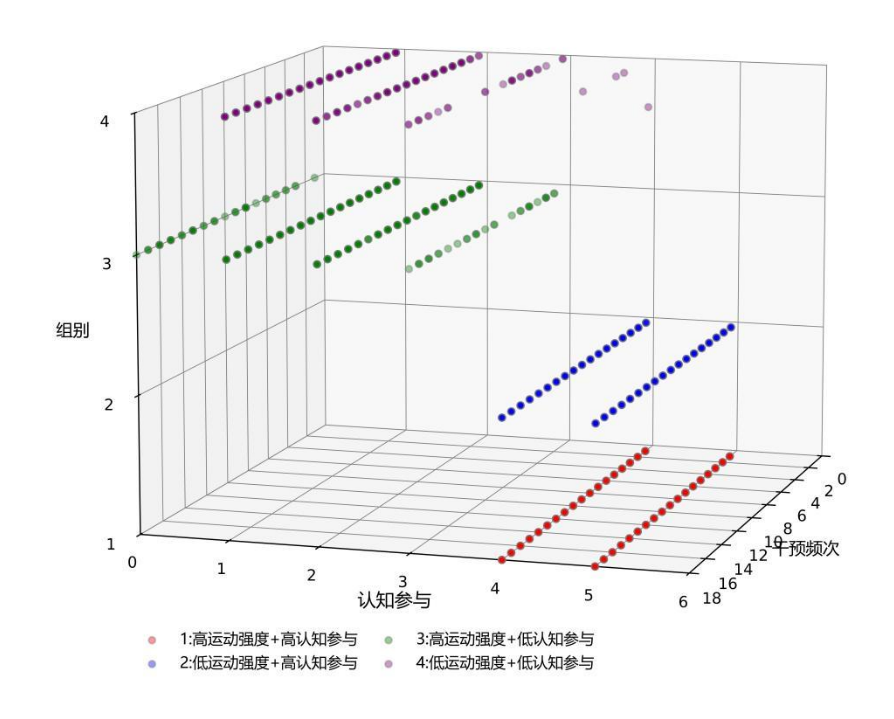


图 11　实验 2 各组被试每次干预后认知参与得分的可视化分布

3.2.2　儿童执行功能基线水平的描述统计与差异检验

在实验二开始前，我们先对高运动强度+高认知参与组、低运动强度+高认知参与组、高运动强度+低认知参与组和低运动强度+低认知参与组四组被试反应抑制和工作记忆刷新的基线水平进行测试，采用方差分析对四组被试的成绩进行差异检验，以排除基线反应抑制和工作记忆刷新水平对训练效果的影响。结果显示，四组被试的反应抑制和工作记忆刷新基线水平均不存在显著差异($Ps > 0.05$)，说明基线各组控制有效，详见表 S3。

3.2.3　运动强度和认知参与对儿童反应抑制和工作记忆刷新能力的影响

为观察各组训练前后运动强度和认知参与对儿童反应抑制和工作记忆刷新能力的影响效果，我们对高运动强度+高认知参与组、低运动强度+高认知参与组、高运动强度+低认知参与组和低运动强度+低认知参与组在前测、四周后测和六周后测的成绩进行了描述统计，详见表 S4。在描述统计的基础之上，我们进一步采用 3(测试阶段：前测、四周后测、六周后测)×2(运动强度：高、低)×2(认知参与：高、低)的重复测量方差分析来探讨运动强度和认知参与对儿童反应抑制和工作记忆刷新能力的影响，其中，测试阶段为被试内变量，运动强度和认知参与为被试间变量，结果详见表 6。

表 6 各组干预前后运动强度和认知参与对反应抑制和工作记忆刷新的影响效果

变量	任务指标	因素	*dfs*	*F*	*P*	η_p^2
反应抑制	Go/No-go	测试阶段	(3，116)	29.881	<0.001***	0.205

	任务	运动强度	(3，116)	18.837	<0.001***	0.140
	No-go 正确	测试阶段×运动强度	(3，116)	0.835	0.435	0.007
	率	认知参与	(3，116)	70.784	<0.001***	0.379
		测试阶段×认知参与	(3，116)	13.170	<0.001***	0.102
		测试阶段×运动强度×认知参与	(3，116)	0.584	0.558	0.005
		运动强度×认知参与	(3，116)	1.197	0.276	0.010
工作记忆刷新	数字刷新任务平均正确率	测试阶段	(3，116)	297.245	<0.001***	0.719
		运动强度	(3，116)	40.654	<0.001***	0.260
		测试阶段×运动强度	(3，116)	18.548	<0.001***	0.138
		认知参与	(3，116)	138.775	<0.001***	0.545
		测试阶段×认知参与	(3，116)	42.942	<0.001***	0.270
		测试阶段×运动强度×认知参与	(3，116)	2.049	0.140	0.017
		运动强度×认知参与	(3，116)	0.496	0.483	0.004

对于反应抑制而言，结果显示，测试阶段主效应显著，$F(3, 116) = 29.881$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.205$，四周后测($M = 0.821$, $SD = 0.010$)和六周后测($M = 0.829$, $SD = 0.010$)的成绩均显著高于前测($M = 0.738$, $SD = 0.007$)；运动强度主效应显著，$F(3, 116) = 18.837$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.140$，高运动强度($M = 0.819$, $SD = 0.008$)的成绩显著高于低运动强度($M = 0.773$, $SD = 0.008$)的成绩；测试阶段×运动强度的交互作用不显著，$F(3, 116) = 0.835$，$p = 0.435$，$\eta_p^2 = 0.007$；认知参与主效应显著，$F(3, 116) = 70.784$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.379$，高认知参与($M = 0.841$, $SD = 0.008$)的成绩显著高于低认知参与($M = 0.751$, $SD = 0.008$)的成绩；测试阶段×认知参与的交互作用显著，$F(3, 116) = 13.170$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.102$。进一步简单效应分析发现，在四周后测条件下，高认知参与组($M = 0.881$, $SD = 0.015$)的反应抑制成绩显著高于低认知参与组($M = 0.761$, $SD = 0.015$)，$F(3, 116) = 33.180$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.222$。在六周后测条件下，高认知参与组($M = 0.897$, $SD = 0.014$)的反应抑制成绩同样显著高于低认知参与组($M = 0.761$, $SD = 0.014$)，$F(3, 116) = 44.970$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.279$。在高认知参与条件下，四周后测($M = 0.881$, $SD = 0.015$)和六周后测($M = 0.897$, $SD = 0.014$)的反应抑制成绩均显著高于前测($M = 0.744$, $SD = 0.009$)，$F(3, 116) = 49.274$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.461$。相比之下，在低认知参与条件下，各测试阶段的反应抑制成绩均不存在显著差异，$F(3, 116) = 2.024$，$p = 0.137$，$\eta_p^2 = 0.034$。这说明，与运动强度相比，运动视频游戏中的认知参与对儿童反应抑制能力的影响更大。其原

因在于，一方面，认知参与($\eta_p^2 = 0.379$)的效应量比运动强度($\eta_p^2 = 0.140$)更大，另一方面，随着训练时间的延长，运动视频游戏中的认知参与量越高，儿童反应抑制能力的提升效果越好，而运动强度并不存在这种现象；测试阶段×运动强度×认知参与的交互作用不显著，$F(3, 116) = 0.584$，$p = 0.558$，$\eta_p^2 = 0.005$；运动强度×认知参与的交互作用不显著，$F(3, 116) = 1.197$，$p = 0.276$，$\eta_p^2 = 0.010$。详见图 9。

对于工作记忆刷新而言，结果显示，测试阶段主效应显著，$F(3, 116) = 297.245$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.719$，六周后测($M = 0.722, SD = 0.005$)的成绩显著高于四周后测($M = 0.697, SD = 0.007$)和前测($M = 0.537, SD = 0.005$)；运动强度主效应显著，$F(3, 116) = 40.654$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.260$，高运动强度($M = 0.673, SD = 0.005$)的成绩显著高于低运动强度($M = 0.631, SD = 0.005$)的成绩；测试阶段×运动强度的交互作用显著，$F(3, 116) = 18.548$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.138$。进一步简单效应分析发现，在四周后测条件下，高运动强度组($M = 0.731, SD = 0.010$)的工作记忆刷新成绩显著高于低运动强度组($M = 0.663, SD = 0.010$)，$F(3, 116) = 23.167$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.166$。在六周后测条件下，高运动强度组($M = 0.759, SD = 0.007$)的工作记忆刷新成绩同样显著高于低运动强度组($M = 0.686, SD = 0.007$)，$F(3, 116) = 63.161$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.353$。在低运动强度条件下，六周后测($M = 0.686, SD = 0.007$)的成绩显著高于四周后测($M = 0.663, SD = 0.010$)和前测($M = 0.545, SD = 0.008$)，$F(3, 116) = 118.403$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.673$。在高运动强度条件下，六周后测($M = 0.759, SD = 0.007$)的成绩同样显著高于四周后测($M = 0.731, SD = 0.010$)和前测($M = 0.529, SD = 0.008$)，$F(3, 116) = 317.288$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.847$。这表明，运动强度对儿童工作记忆刷新能力的提升具有显著影响，无论在四周后测还是六周后测，高运动强度组的成绩均显著高于低运动强度组，且随着运动训练的持续，效果愈加明显。此外，虽然低运动强度组在长期训练后其工作记忆刷新能力也表现出一定程度的进步，但提升幅度较小，这说明高强度运动视频游戏训练更能促进儿童工作记忆刷新能力的提升，且具有更强的持久性；认知参与主效应显著，$F(3, 116) = 138.775$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.545$，高认知参与($M = 0.691, SD = 0.005$)的成绩显著高于低认知参与($M = 0.614, SD = 0.005$)的成绩；测试阶段×认知参与的交互作用显著，$F(3, 116) = 42.942$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.270$。进一步简单效应分析发现，在四周后测条件下，高认知参与组($M = 0.756, SD = 0.010$)的工作记忆刷新成绩显著高于低认知参与组($M = 0.638, SD = 0.010$)，$F(3, 116) = 69.029$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.373$。在六周后测条件下，高认知参与组($M = 0.785, SD = 0.007$)的工作记忆刷新成绩同样显著高于低认知参与组($M = 0.660, SD = 0.007$)，$F(3, 116) = 183.365$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.613$。在高认知参与条件下，六周后测($M = 0.785, SD = 0.007$)的工作记忆刷新成绩显著高于四周后测($M = 0.756,$

SD = 0.010)和前测(M = 0.532, SD = 0.008)，$F(3, 116)$ = 384.635，$p < 0.001$，η_p^2 = 0.870。在低认知参与条件下，六周后测(M = 0.660, SD = 0.007)和四周后测(M = 0.638, SD = 0.010)的工作记忆刷新成绩均显著高于前测(M = 0.543, SD = 0.008)，$F(3, 116)$ = 82.589，$p < 0.001$，η_p^2 = 0.590，然而，六周后测和四周后测的成绩并不存在显著差异($P > 0.05$)。这表明，运动视频游戏中的认知参与在促进儿童工作记忆刷新方面具有重要作用。具体而言，无论是四周后测还是六周后测，高认知参与组的成绩均显著高于低认知参与组，并且随着训练时间的延续，这种提升效果得到了进一步增强。相比之下，尽管低认知参与组的工作记忆刷新能力也得到了提升，但进步幅度相对较小，并且在训练四周后，这种提升效果趋于平稳。测试阶段×运动强度×认知参与的交互作用不显著，$F(2, 87)$ = 2.049，p = 0.140，η_p^2 = 0.017；运动强度×认知参与的交互作用不显著，$F(2, 87)$ = 0.496，p = 0.483，η_p^2 = 0.004。详见图 12。

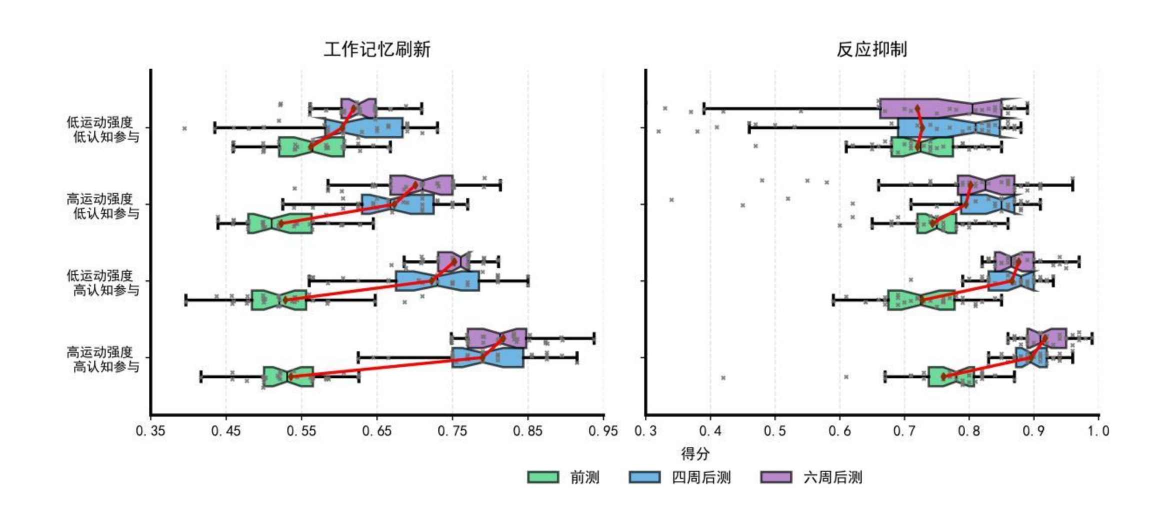


图 12　四个实验组训练前后工作记忆刷新和反应抑制得分的变化趋势

4 讨论

本研究通过两项实验探讨了运动视频游戏训练对儿童执行功能的影响，并进一步分析了运动强度和认知参与在干预效果中的作用机制。实验 1 的结果表明，运动视频游戏训练在提升反应抑制和工作记忆刷新能力方面具有显著优势，相较于运动+视频游戏训练，其干预效果更为突出。具体而言，运动视频游戏训练能够有效提高儿童的反应抑制能力，而运动+视频游戏训练虽也有所提升，但效果较弱。此外，运动视频游戏组在工作记忆刷新任务中的表现随着训练时间的延长持续提升，并显著优于运动+视频游戏组。相较之下，干扰抑制能力未显示显著改善，而注意转换能力虽在所有组别均有所提升，但组间差异不显著，表明该能力的提升可能受多种因素影响，而非单一训练模式所致。实验 2 进一步探讨了运动强度和认知参与在执行功能提升中所起的作用。结果显示，认知参与对反应抑制的影响最为显著，随

着训练时间的延长，该效应进一步增强，而运动强度的影响相对较小，且未呈现明显的累积效应。此外，在工作记忆刷新任务中，高运动强度和高认知参与均能显著提升儿童的成绩，且两者的促进作用随着训练时间的延续不断增强，但二者之间未呈现显著的交互作用，表明其对认知提升的作用路径可能相互独立。整体而言，研究表明认知参与在执行功能提升中的作用更为关键，特别是在长期训练后，其对反应抑制和工作记忆刷新的促进效果更为显著和持久。相较之下，运动强度主要影响工作记忆刷新能力，但在低运动强度条件下，其促进作用相对有限。这一发现为优化运动视频游戏训练的干预策略提供了实证支持，并强调在设计干预方案时，应优先考虑提升认知参与水平，以最大化训练效果。

4.1 不同组合模式的运动视频游戏训练对儿童执行功能的影响

在具身认知的理论框架下，运动视频游戏训练能够最大化利用多感官输入(如视觉、听觉、前庭觉和本体觉)，通过增强动态环境中的决策能力和执行控制能力，促进神经可塑性和认知能力的发展(Herold et al., 2018; Huber et al., 2024)。实验 1 探讨了不同模式的运动视频游戏训练对儿童执行功能的影响差异，结果表明，运动视频游戏训练能够显著提高儿童的反应抑制和工作记忆刷新能力，且在提升效果上明显优于运动+视频游戏训练。这一发现进一步支持了具身认知理论的基本假设，并为优化运动-认知融合训练模式提供了新的实证依据。

首先，本研究发现，经过长期训练后，运动视频游戏组的反应抑制能力较运动+视频游戏训练组和控制组有显著提升，这一结果与已有研究一致。例如，Kou 等人(2024)的元分析研究表明，运动视频游戏训练对儿童的抑制控制能力具有显著促进作用。这可能是因为，相较于执行功能的其他维度，儿童的抑制控制能力更容易受到运动训练的影响。Thapa 等人(2020)指出，运动视频游戏训练可以通过增强大脑激活和功能性神经可塑性来改善执行功能，包括促进神经递质的分泌、提高大脑血流量以及提升多巴胺水平，从而优化个体的认知表现(Sung et al., 2022)。此外，Ji 等人(2023)和 Liao 等人(2020)的研究进一步支持了这一结论，他们发现，相较于单纯的运动或认知训练，运动视频游戏训练能够整合多种感觉输入，要求个体在动态环境中持续进行认知控制，这种融合性有助于提升反应抑制能力(Yogev-Seligmann et al., 2012)。相反，运动+视频游戏训练的效果不显著可能与“中央容量共享模型”(Tombu & Jolicoeur, 2003)有关，该模型指出，在双任务情境下，个体的认知资源有限，必须在多个任务之间进行资源分配，导致至少一个任务的执行效果下降。因此，运动+视频游戏训练可能因运动和认知任务的竞争，削弱了其对反应抑制能力的促进作用，而运动视频游戏训练的高融合性则有效规避了这一问题，使其成为更有效的干预手段。

其次，本研究发现，在干预四周后，运动视频游戏组和运动+视频游戏组的工作记忆刷

新能力均优于控制组，但随着训练时间的延续，仅运动视频游戏组的成绩持续提升，而运动+视频游戏组的成绩在四周后达到峰值后未出现显著提高。这表明，运动视频游戏训练相较于运动+视频游戏训练，更有利于工作记忆刷新的长期提升。这一发现与适应能力模型相符，该模型认为，在复杂的认知活动中进行体育锻炼能够促进神经可塑性，从而提升工作记忆能力(Raichlen & Alexander, 2017)。此外，根据促进-引导模型(Fabel et al., 2009)，运动会激活中枢神经系统，而外周的肌肉和感觉反馈进一步影响大脑活动，这种相互作用能够增强神经可塑性，从而促进工作记忆的提升。运动视频游戏训练通过结合运动和认知任务，加强了这一互动，并产生协同效应，使训练效果得以迁移至未受训练的认知任务(Raichlen & Alexander, 2017)。这一发现也与 Kamijo 等人(2019)的研究结果相符，即体育锻炼能够增强大脑的新陈代谢，而认知训练则通过增加心理需求，引导并强化大脑可塑性，使训练效果更加持久。此外，随着训练时间的延长，运动视频游戏组的工作记忆刷新能力持续提升，这一现象可由"认知丰富假说" (Hertzog et al., 2008)解释，该假说认为，认知活动、社交互动和身体运动的结合能够通过丰富环境刺激，提高个体的认知功能。运动视频游戏训练的沉浸式游戏情境和社交互动可能增强了儿童的持续训练动机，使其在长期干预中保持较高的参与度，从而进一步巩固训练效果。相比之下，运动+视频游戏训练虽然在早期阶段对工作记忆刷新有所促进，但由于认知任务和运动任务相互独立，未能形成强有力的整合机制，使得训练效果未能持续增强(Huber et al., 2024)。

最后，本研究发现，无论是运动视频游戏训练还是运动+视频游戏训练，在干扰抑制和注意转换能力方面均未显示显著效果。首先，训练后儿童的干扰抑制能力并未得到明显改善，甚至在某些情况下出现下降，这可能与运动与认知任务的双任务干扰效应有关。Lai 等人(2017)的研究指出，同时进行运动和认知训练可能会增加个体的认知负荷，从而影响执行功能的表现。此外，中央容量共享模型也解释了这一现象，即在执行多个任务时，有限的认知资源可能会被分散，从而导致某些任务表现下降(Tombu & Jolicoeur, 2003)。对于注意转换任务，虽然所有组别在训练后均有所提升，但未出现显著的组间差异。这一结果与 Yongtawee 等人(2017)的研究相符，他们发现，青少年的注意转换能力在运动训练后并未表现出显著改善，可能是因为运动训练主要促进较低层次的执行功能(如反应抑制和工作记忆刷新)，而对较高层次的执行功能(如注意转换)影响较小。此外，Diamond 和 Lee(2011)的研究表明，基线认知能力较低的个体在注意转换任务中的改善空间更大，而本研究的被试可能在基线时已有较高的注意转换能力，因此训练效果未能进一步提升。

综上所述，运动视频游戏训练在提升反应抑制和工作记忆刷新能力方面效果显著，并优

于运动+视频游戏训练。这可能得益于运动视频游戏训练在运动和认知任务上的高度融合，使得训练效果更加持久且具有迁移性。然而，在干扰抑制和注意转换方面，两种训练方式均未显示明显改善，可能受限于认知资源的分配和个体基线能力的影响。这一发现为运动视频游戏训练在儿童执行功能发展中的应用提供了新的实证支持，并为未来研究提供了重要方向。

4.2 运动视频游戏训练促进儿童的执行功能：运动强度和认知参与的作用

基于实验 1 所得出的结论，我们发现，相比于运动+视频游戏训练，运动视频游戏训练更有助于儿童执行功能的提升，特别是在反应抑制和工作记忆刷新方面。运动强度和认知参与作为影响运动干预效果的两个关键因素，实验 2 进一步探讨了它们在运动视频游戏训练中的作用。结果表明，相较于运动强度，认知参与对儿童反应抑制的影响更加显著且持久，提示认知参与可能是提升儿童反应抑制能力的核心因素。而在工作记忆提升方面，尽管运动强度和认知参与均对其有所促进，但两者的交互作用不显著，这表明它们各自通过不同的机制影响认知功能。

运动强度与认知参与对执行功能的影响可以通过认知刺激假说和生理唤醒理论加以理解。运动强度主要通过生理唤醒机制来促进执行功能。生理唤醒水平的提高有助于大脑神经递质的释放，进而增强注意力和反应控制(Dishman et al., 2006)。然而，运动强度的效应通常较为短期，且其对反应抑制的提升效果较为有限，特别是在低强度运动中，未能有效激发足够的生理唤醒，导致其促进执行功能的效果较弱(Audiffren et al., 2008)。此外，尽管中到高强度运动能够通过增强唤醒来促进反应抑制(Best, 2012)，但其长期效果的研究较为匮乏，这表明运动强度的影响可能在持续性和长效性方面存在一定的局限性。

与运动强度相比，认知参与则通过激活控制高阶认知过程的相同脑区来促进执行功能的提升，符合认知刺激假说的理论框架(Benzing et al., 2016)。该假说认为，运动中的认知挑战能够激活大脑中与认知控制相关的区域，从而提高儿童的执行功能。在本研究中，认知参与的强度与反应抑制能力的提高呈正相关，且这种影响在长期训练中尤为显著。这一发现与 Flynn 等人(2018)的研究一致，后者指出，高认知参与显著提升了儿童的执行功能，并且在高认知挑战的活动中，神经可塑性变化更加明显。例如，集体体育活动如足球、篮球，不仅能促进身体健康，还能通过不断挑战认知能力，促进执行功能的发展(Davis et al., 2011)。因此，认知参与可能在执行功能的提升中起到更为核心的作用，而不仅仅是运动强度的简单补充。认知参与的增强能够通过激活前额叶皮层、基底神经节和小脑等相关大脑区域，促进执行功能的提升(Valkenborghs et al., 2019)。这一过程通过促进神经可塑性，使得大脑在执行任务时能够更有效地处理信息和进行决策(Adcock et al., 2020)此外，认知刺激假说支持这一理

论，指出高认知参与的运动能够提前激活高阶认知控制区，增强大脑的执行功能处理能力(Ishihara et al., 2017)。因此，相较于运动强度，认知参与不仅对反应抑制具有持久的促进作用，还在工作记忆等其他执行功能方面表现出显著效果。

在工作记忆方面，运动强度对其提升具有显著且持久的影响，尤其是在高强度运动下，这一效应得到了 Best(2012)以及盖笑松等人(2021)的实证支持。这些研究表明，高强度运动通过增强生理唤醒，促进大脑资源的更多分配，从而提高工作记忆等执行功能。然而，低强度运动未能产生足够的生理唤醒，导致其对工作记忆的提升效果较弱(Hillman et al., 2009)。相比之下，认知参与的提高能够显著增强工作记忆，特别是在认知参与程度高的训练中，随着时间的延续，效果愈加明显。Li(2020)的研究也指出，运动视频游戏中的认知参与和运动强度均能促进儿童的执行功能，尤其是在工作记忆和认知灵活性方面。尽管运动强度和认知参与均对工作记忆有显著提升作用，但两者之间的交互作用并不显著。其可能的原因在于，运动强度和认知参与通过不同的神经生物学机制独立作用于执行功能。运动强度通过生理唤醒和注意资源的调节来影响执行功能，而认知参与通过复杂的任务挑战和认知策略调整来促进神经可塑性(Miyamoto et al., 2018)。这些机制虽然各自有效，但未能在本研究中显现出显著的交互作用。

综上所述，认知参与对儿童执行功能的提升，尤其是在反应抑制和工作记忆方面，起到了更为关键的作用。未来研究可以在设计运动视频游戏时，注重提高认知参与的程度，并探索不同运动强度和认知参与结合的最优干预策略，以期为儿童执行功能的长期发展提供更多理论依据和实践指导。

4.3 研究不足与展望

本研究在探讨运动视频游戏训练对儿童执行功能的影响及不同训练模式下的干预效果方面取得了一定进展，但仍存在一些不足之处，值得在未来的研究中进一步改进和深入探讨。

首先，尽管本研究在实验设计中尽力控制了实验材料的同质性，并减少了无关变量的干扰，现有的干预方案缺乏针对训练难度的动态调整。所有训练内容均保持在相对固定的难度水平，可能导致部分参与者在训练过程中产生适应性反应，从而限制了长期效果的进一步提升。为此，未来研究应引入渐进式的训练难度调整机制，使参与者能够在不同难度水平上持续挑战自我，进而确保训练效果的长期稳定性与逐步增强(Lillard & Peterson, 2011)。这一调整不仅能够避免适应性瓶颈的产生，还能更精准地评估不同难度设置对执行功能提升的具体影响。

其次，本研究未能充分探讨运动视频游戏训练的延时效应。由于实验设计的限制，未进

行延时后测，因此未能全面评估运动视频游戏训练对儿童执行功能的长期影响。未来的研究可以通过延长后测时间，特别是在训练结束后的反应抑制和工作记忆等核心执行功能的变化，来进一步了解其持久效应(Okuyama et al., 2020)。此外，研究还可探讨不同训练强度、认知参与度及其交互作用对执行功能延时效应的影响，以期明确最佳干预方案的长期效果及其持续性。

最后，本研究主要集中在行为学指标的测量，虽然为运动视频游戏训练对儿童执行功能的影响提供了有力的实证支持，但未涉及相关脑机制的变化。为了更全面地了解运动视频游戏如何通过神经机制调节执行功能，未来的研究应结合脑成像技术(如近红外光谱脑成像、功能磁共振成像等)及神经电生理技术(如事件相关电位)来探讨运动视频游戏训练对大脑功能的具体影响。这将有助于揭示运动与认知训练对执行功能改善的神经生物学基础，为优化训练方案提供更具科学依据的指导。通过这些改进，未来研究可以为儿童执行功能的训练提供更加系统和精准的理论支持。

5　结论

本研究探讨了运动视频游戏训练对儿童执行功能的影响，重点分析了不同训练模式(融合式与结合式)及认知参与和运动强度在其中的作用。研究发现，运动视频游戏训练在提升儿童反应抑制和工作记忆刷新能力方面表现出显著效果，且效果明显优于运动+视频游戏训练。此外，实验结果表明，认知参与在提升反应抑制能力方面的作用更为显著且持久，而运动强度虽然也对工作记忆有所促进，但二者未表现出交互作用，提示其各自可能通过不同的认知机制发挥作用。基于这些发现，建议未来研究在儿童执行功能训练中优先采用融合式训练模式，注重设计具有高认知参与的任务，并根据个体差异灵活调整运动强度。总的来说，本研究不仅丰富了运动-认知领域的理论，也为教育实践提供了重要启示，强调了认知任务和运动强度调整的结合对儿童认知发展的积极影响。

参考文献

Abou Naaj, M., Nachouki, M., & LEzzar, S. (2021, August). The impact of video game addiction on students' performance during COVID-19 pandemic. In *2021 16th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE)* (pp. 55-60). IEEE.

Adcock, M., Fankhauser, M., Post, J., et al. (2020). Effects of an in-home multicomponent exergame training on physical functions, cognition, and brain volume of older adults: A randomized controlled trial. *Frontiers in medicine, 6*(1), 321.

Amatriain-Fernández, S., Ezquerro García-Noblejas, M., & Budde, H. (2021). Effects of chronic exercise on the inhibitory control of children and adolescents: A systematic review and meta-analysis. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 31*(6), 1196-1208.

Anzeneder, S., Benzing, V., & Schmidt, M. (2023). Desi gned acute physical activity to benefit primary school children's cognition: Effects of cognitive challenge, bout duration and positive affect. *Current Issues in Sport Science (CISS), 8*(2), 25.

Audiffren, M., Tomporowski, P. D., Zagrodnik, J. (2008). Acute aerobic exercise an information processing: Energizing motor processes during a choice reaction time task. *Acta Psychol, 129*(3), 410-419.

Benzing, V., Heinks, T., Eggenberger, N., & Schmidt, M. (2016). Acute cognitively engaging exergame-based physical activity enhances executive functions in adolescents. *PloS one, 11*(12), e0167501.

Best, J. R. (2010). Effects of physical activity on children's executive function: Contributions of experimental research on aerobic exercise. *Developmental review, 30*(4), 331-351.

Best, J. R. (2012). Exergaming immediately enhances children's executive function. *Developmental Psychology, 48*(5), 1501-1510.

Blakey, E., Matthews, D., Cragg, L., Buck, J., Cameron, D., Higgins, B., ... & Carroll, D. J. (2020). The role of executive functions in socioeconomic attainment gaps: Results from a randomized controlled trial. *Child Development, 91*(5), 1594–1614.

Borg, G. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine & Science in Sports & Exercise, 14*(5), 377-381.

Castellote-Caballero, Y., Carcelén Fraile, M. D. C., Aibar-Almazán, A., Afanador-Restrepo, D. F., González-Martín, A. M. (2024). Effect of combined physical–cognitive training on the functional and cognitive capacity of older people with mild cognitive impairment: a randomized controlled trial. *BMC Medicine, 22*(1), 281.

Chang, E. C. H., Chu, C. H., Karageorghis, C. I., Wang, C. C., Tsai, J. H. C., Wang, Y. S., & Chang, Y. K. (2017). Relationship between mode of sport training and general cognitive performance. *Journal of Sport and Health Science, 6*(1), 89-95.

Chartier, C., Godard, J., Durand, S., Humeau-Heurtier, A., Menetrier, E., Allain, P., & Besnard, J. (2024). Combinations of physical and cognitive training for subcortical neurodegenerative diseases with physical, cognitive and behavioral symptoms: a systematic review. *Neurological Sciences,* 1-19.

Contreras-Osorio, F., Campos-Jara, C., Martínez-Salazar, C., Chirosa-Ríos, L., & Martínez-García, D. (2021). Effects of sport-based interventions on children's executive function: A systematic review and meta-analysis. *Brain sciences, 11*(6), 755.

Contreras-Osorio, F., Guzmán-Guzmán, I. P., Cerda-Vega, E., Chirosa-Ríos, L., Ramírez-Campillo, R., & Campos-Jara, C. (2022). Effects of the type of sports practice on the executive functions of schoolchildren. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 19*(7), 3886.

Cumming, M. M., Smith, S. W., & O'Brien, K. (2019). Perceived stress, executive function, perceived stress regulation, and behavioral outcomes of adolescents with and without significant behavior problems. Psychology in the Schools, 56(9), 1359-1380.

Davis, C. L., Tomporowski, P. D., Mcdowell, J. E., Austin, B. P., Miller, P. H., Yanasak, N. E., Naglieri, J. A. (2011). Exercise improves executive function and achievement and alters brain activation in overweight children: a randomized, controlled trial. *Health Psychology Official Journal of the Division of Health Psychology American Psychological Association, 30*(1), 91.

Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology, 64*, 135–168.

Diamond, A., & Lee, K. (2011). Interventions shown to aid executive function development in children 4 to 12 years old. *Science, 333*(6045), 959 – 964.

Dishman, R. K., Berthoud, H. R., Booth, F. W., Cotman, C. W., Edgerton, V. R., Fleshner, M. R., ... & Zigmond, M. J. (2006). Neurobiology of exercise. *Obesity, 14*(3), 345-356.

Eggenberger, P., Schumacher, V., Angst, M., et al. (2015). Does multicomponent physical exercise with simultaneous cognitive training boost cognitive performance in older adults? A 6-month randomized controlled trial with a 1-year follow-up. *Clinical Intervetional aging, 10*, 1335–1349.

Fabel, K., Wolf, S., Ehninger, D., et al. (2009). Additive effects of physical exercise and environmental enrichment on adult hippocampal neurogenesis in mice. *Frontiers in Neuroscience, 3*(50), 50.

Festa, F., Medori, S., & Macrì, M. (2023). Move Your Body, Boost Your Brain: The Positive Impact of Physical Activity on Cognition across All Age Groups. *Biomedicines, 11*(6), 1765.

Flynn, R. M., Richert, R. A. (2018). Cognitive, not physical, engagement in video gaming influences executive functioning. *Journal of Cognition and Development, 19*(1), 1-20.

Foglia, L., & Wilson, R. A. (2013). Embodied cognition. Wiley Interdisciplinary Reviews: *Cognitive Science, 4*(3), 319-325.

Formenti, D., Trecroci, A., Duca, M., Cavaggioni, L., D'Angelo, F., Passi, A., ... & Alberti, G. (2021). Differences in inhibitory control and motor fitness in children practicing open and closed skill sports. *Scientific Reports, 11*(1), 4033.

Gai, X., Xu, J., Yan, Y., Wang, Y., & Xie, X. (2021). The role of exercise intensity and cognitive engagement in the promotion of executive function in children through motion-based games. *Acta Psychologica Sinica, 53*(5), 505-514.

[盖笑松，许洁，闫艳，王元，谢笑春. (2021). 体感游戏促进儿童的执行功能：运动强度和认知参与的作用. *心理学报, 53*(05), 505-514.]

Gates, N. J., Rutjes, A. W., & Di, N., et al. (2019). Computerised cognitive training for maintaining cognitive function in cognitively healthy people in late life. *Cohrane Database of Systematic Reviews, 2*(6), 12277.

George, A. S., George, A. H., & Baskar, T. (2023). Neuro-Gaming: How Video Games Shape the Brain's Cognitive Landscape. *Partners Universal International Research Journal, 2*(4), 128-137.

Gu, Q., Zou, L., Loprinzi, P. D., Quan, M., & Huang, T. (2019). Effects of open versus closed skill exercise on cognitive function: a systematic review. *Frontiers in psychology, 10*, 1707.

Herold, F., Hamacher, D., Schega, L., et al. (2018). Thinking While Moving or Moving While Thinking-Concepts of Motor-Cognitive Training for Cognitive Performance Enhancement. *Frontiers in Aging Neuroscience, 10*(2), 228.

Hertzog, C., Kramer, A. F., Wllson, R. S., Lindenberger, U. (2008). Enrichment Effects on Adult Cognitive Development: Can the Functional Capacity of Older Adults Be Preserved and Enhanced? *Psychological Science in the Public Interest, 9*(1), 1-65.

Hillman, C. H., Pontifex, M. B., Raine, L. B., Castelli, D. M., Hall, E. E., &Kramer, A. F. (2009). The effect of acute treadmill walking on cognitive control and academic achievement in preadolescent children. *Neuroscience, 159*, 1044–1054.

Huber, S. K., Knols, R. H., Held, J. P. O., Betschart, M., & de Bruin, E. D. (2024). PEMOCS: Evaluating the

effects of a concept-guided, personalised, motor-cognitive exergame training on cognitive functions and gait in chronic Stroke—study protocol for a randomised controlled trial. *Trials, 25*(1), 451.

Irak, M., & Soylu, C. (2023). Effects of excessive video game playing on event-related brain potentials during working memory. *Current Psychology, 42*(3), 1881-1895.

Ishihara, T., Sugasawa, S., Matsuda, Y., & Mizuno, M. (2017). Relationship of tennis play to executive function in children and adolescents. *European journal of sport science, 17*(8), 1074-1083.

Ji H, Wu S, Won J, Weng S, Lee S, Seo S, et al. (2023). The effects of exergaming on attention in children with attention deficit/hyperactivity disorder: randomized controlled trial. *JMIR Serious Games, 1*, e40438.

Ji, Z., Feng, T., Wang, H. (2020). The effects of 12-week physical exercise tapping high-level cognitive functions. *Advances in Cognitive Psychology, 16*(1) , 59-66.

Jiang, Z., Jia, X., Tao, R., & Dördüncü, H. (2022). COVID-19: A Source of Stress and Depression Among University Students and Poor Academic Performance. *Frontiers in Public Health, 10*, 898556.

Kamijo, K. Abe, R. (2019). After effects of cognitively demanding acute aerobic exercise on working memory. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 51*(1) , 153-159.

Kou, R., Zhang, Z., Zhu, F., Tang, Y., & Li, Z. (2024). Effects of exergaming on executive function and motor ability in children: A systematic review and meta-analysis. *PLOS ONE, 19*(9).

Lai, L., Bruce, H., Bherer, L., Lussier, M., Li, K.(2017).Comparing the transfer effects of simultaneously and sequentially combined aerobic exercise and cognitive training in older adults. *Journal of Cognitive Enhancement, 1*(4), 478–490.

Lauenroth, A., Ioannidis, A. E., Teichmann, B. (2016). Influence of combined physical and cognitive training on cognition: a systematic review. *BMC Geriatrics, 16* , 141.

Li, X., Niksirat, K. S., Chen, S., et al. (2020). The impact of a multitasking-based virtual reality motion video game on the cognitive and physical abilities of older adults. *Sustainability, 12*(21) , 9106.

Liao, Y. Y., Tseng, H. Y., Lin, Y. J., et al. (2020). Using virtual reality-based training to improve cognitive function, instrumental activities of daily living and neural efficiency in older adults with mild cognitive impairment. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine, 56*(1), 56-59.

Lillard, A. S., & Peterson, J. (2011). The immediate impact of different types of television on young children's executive function. *Pediatrics, 128*(4), 644-649.

Lind, R. R., Beck, M. M., Wikman, J., Malarski, K., Krustrup, P., Lundbye-Jensen, J., & Geertsen, S. S. (2019). Acute high-intensity football games can improve children's inhibitory control and neurophysiological measures of attention. *Scandinavian journal of medicine & science in sports, 29*(10), 1546-1562.

Lucia, S., Bianco, V., & Di Russo, F. (2023). Specific effect of a cognitive-motor dual-task training on sport performance and brain processing associated with decision-making in semi-elite basketball players. *Psychology of sport and exercise, 64*, 102302.

Ma, C., Wang, Y., Fu, J., & Zhao, X. (2025). Effects of different types of academic pressure on executive function subcomponents in high school students of different grades. *Acta Psychologica Sinica, 57*(1), 18-35.

[马超，汪彦云，付军军 & 赵鑫. (2025). 不同类型学业压力对不同年级高中生执行功能子成分的影响. *心理学报, 57* (01), 18-35.]

Magistro, D., Cooper, S. B., Boat, R., Carlevaro, F., Magno, F., Castagno, C., ... & Musella, G. (2022). An After-School Football Session Transiently Improves Cognitive Function in Children. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 20*(1), 164.

McEwen, B. S., & Morrison, J. H. (2013). The brain on stress: vulnerability and plasticity of the prefrontal cortex over the life course. *Neuron, 79*(1), 16-29.

McMorris, T., Turner, A., Hale, B. J., & Sproule, J. (2016). Beyond the catecholamines hypothesis for an acute

exercise–cognition interaction: A neurochemical perspective.

Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex “frontal lobe” tasks: A latent variable analysis. *Cognitive psychology, 41*(1), 49-100.

Miyamoto, T., Hashimoto, S., Yanamoto, H., Ikawa, M., Nakano, Y., Sekiyama, T., ... & Fujioka, H. (2018). Response of brain-derived neurotrophic factor to combining cognitive and physical exercise. *European journal of sport science, 18*(8), 1119-1127.

Mothes, L., Haag Kristensen, C., Grassi Oliveira, R., Iracema de Lima Argimon, I., Paz Fonseca, R., & Quarti Irigaray, T. (2017). Stressful Events and Executive Functioning in Adolescents with and without History of Grade Repetition. *Universitas Psychologica, 16*(4), 139-150.

Okuyama, H., Nakatani, Y., & Yamamoto, T. (2020). The impact of video games on children's cognitive development and executive function. *Cognitive Development, 54*, 100889.

Pesce, C. (2012). Shifting the focus from quantitative to qualitative exercise characteristics in exercise and cognition research. *Journal of Sport and Exercise Psychology, 34*(6), 766-786.

Raichlen, D. A., Alexander, G. E. (2017). Adaptive capacity: an evolutionary neuroscience model linking exercise, cognition, and brain health. *Trends in neurosciences, 40*(7), 408-421.

Schäefer, J., Reuter, T., Leuchter, M., & Karbach, J. (2024). Executive functions and problem-solving—The contribution of inhibition, working memory, and cognitive flexibility to science problem-solving performance in elementary school students. *Journal of Experimental Child Psychology, 244*, 105962.

Schäefer, S., Schumacher, V. (2011). The interplay between cognitive and motor functioning in healthy older adults: findings from dual-task studies and suggestions for intervention. *Gerontology, 57*(3), 239-246.

Schmidt, M., Jäger, K., Egger, F., Roebers, C. M., & Conzelmann, A. (2015). Cognitively engaging chronic physical activity, but not aerobic exercise, affects executive functions in primary school children: a group-randomized controlled trial. *Journal of Sport and Exercise Psychology, 37*(6), 575-591.

Shi, P., Tang, Y., Zhang, Z., Feng, X., & Li, C. (2022). Effect of Physical Exercise in Real-World Settings on Executive Function of Typical Children and Adolescents: A Systematic Review. *Brain Sciences, 12*(12), 1734.

Stojan, R., Voelcker-rehage, C. (2019). A systematic review on the cognitive benefits and neurophysiological correlates of exergaming in healthy older adults. *Journal of Clinical Medicine, 8*(5) ,734.

Sung, M-C., Ku, B., Leung, W., et al. (2022). The Effect of Physical Activity Interventions on Executive Function Among People with Neurodevelopmental Disorders: A Meta-Analysis. *J Autism Dev Disord, 52* (3), 1030–1050.

Thapa, N., et al. (2020). The effect of a virtual reality-based intervention program on cognition in older adults with mild cognitive impairment: a randomized control trial. *J. Clin. Med, 9,* 1283.

Tombu, M., Jolicoeur, P. (2003). A central capacity sharing model of dual-task performance Journal of Experimental Psychology.*Human Perception and Performance, 29*, 3-18.

Tsai, Y. J., Hsieh, S. S., Huang, C. J., & Hung, T. M. (2021). Dose﹣response effects of acute aerobic exercise intensity on inhibitory control in children with attention deficit/hyperactivity disorder. *Frontiers in Human Neuroscience, 15*, 316.

Valkenborghs, S. R., Noetel, M., Hillman, C. H., Nilsson, M., Smith, J. J., Ortega, F. B., & Lubans, D. R. (2019). The impact of physical activity on brain structure and function in youth: a systematic review. *Pediatrics, 144*(4).

Wang, C. H., Moreau, D., Yang, C. T., Lin, J. T., Tsai, Y. Y., & Tsai, C. L. (2019). The influence of aerobic fitness on top﹣down and bottom﹣up mechanisms of interference control. *Neuropsychology, 33*(2), 245.

Yao, Y., Cui, R., & Li, Y., et al. (2020). Action real-time strategy gaming experience related to enhanced capacity

of visual working memory. *Frontiers in Human Neuroscience, 14*, 333.

Yogev-seligmann, G., Hausdorff, J. M., Giladi, N. (2012). Do we always prioritize balance when walking? Towards an integrated model of task prioritization. *Movement Disorders, 27*(6), 765-770.

Yongtawee, A., Woo, M. J., Yongtawee, A., & Woo, M. J. (2017). The influence of gender, sports type and training experience on cognitive functions in adolescent athletes. *Exercise Science, 26*(2), 159-167.

Zhao, X., & Jia, L. (2019). Training and transfer effects of interference control training in children and young adults. *Psychological research, 83*(7), 1519-1530.

Zhao, X., Chen, L., & Maes, J. H. (2018). Training and transfer effects of response inhibition training in children and adults. *Developmental science, 21*(1), e12511.

Zhao, X., Li, H., Jin, G., Li, S., Zhou, A., Liang, W., ... & Cai, Y. (2020). The role of phonological memory and central executive function in decoding and language comprehension among children of different grades. *Acta Psychologica Sinica, 52*(4), 469-484.

[赵鑫,李红利,金戈,李世峰,周爱保,梁文佳... & 蔡亚亚. (2020). 语音记忆和中央执行功能在不同年级儿童解码和语言理解中的作用. *心理学报, 52* (04), 469-484.]

Zhao, X., Wang, H., & Maes, J. H. (2020). Training and transfer effects of extensive task-switching training in students. *Psychological Research, 84*(2), 389-403.

Zhao, X., Xu, Y., Fu, J., & Maes, J. H. (2018b). Are training and transfer effects of working memory updating training modulated by achievement motivation?. *Memory & cognition, 46*, 398-409.

Zhu, X., & Zhao, X. (2023). The role of executive function in mathematical ability among children of different grades. *Acta Psychologica Sinica, 55*(5), 696-710.

[祝孝亮 & 赵鑫. (2023). 执行功能在不同年级儿童数学能力中的作用. *心理学报, 55* (05), 696-710.]

Beyond the Screen: Sports Video Game Training Can Better Enhance Children's Executive Functions

MA Chao[1,2], ZHAO Lu[1,2], ZHAO Xin[1,2]

([1]Key Laboratory of Behavioral and Mental Health of Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

([2]School of Psychology, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract

Although executive functions continue to develop throughout the lifespan, childhood is widely regarded as the most critical period for their rapid development and plasticity. Sports video game training, an innovative method that combines sports with cognitive tasks, has shown promise. However, the effects of different combinations of sports and video game elements on children's executive functions, as well as the roles of cognitive engagement and exercise intensity, remain key issues that require further exploration in the motor-cognitive field. Therefore, this study aims to investigate which form of sports video game training is most beneficial for enhancing children's executive functions through two innovative intervention experiments.

Experiment 1 involved 90 children with an average age of 11.34 ± 0.48 years, using a 3 (group: sports video game training, sports + video game training, and control group) × 3 (testing phase: pre-test, four-week post-test, and six-week post-test) mixed experimental design. The aim was to explore the impact of different combinations of sports video game training on various subcomponents of children's executive functions. Experiment 2, building on Experiment 1, involved 120 children with an average age of 12.44 ± 0.61 years. A 2 (sport intensity: high, low) × 2 (cognitive engagement: high, low) × 3 (testing phase: pre-test, four-week post-test, and six-week post-test) mixed experimental design was employed to further analyze the mechanisms through which sport intensity and cognitive engagement influence the effectiveness of sports video game training.

The results of Experiment 1 showed that sports video game training significantly improved children's response inhibition and working memory updating abilities, with effects notably superior to those of sports + video game training. However, no significant training effects were observed in interference inhibition or attention switching. In Experiment 2, it was found that cognitive engagement had a more significant and lasting impact on response inhibition compared to sport intensity, suggesting that cognitive engagement may be a crucial factor in improving children's response inhibition abilities. In contrast, although both sport intensity and cognitive engagement significantly influenced the enhancement of children's working memory updating abilities, their interaction did not show a significant impact on cognitive improvement.

In conclusion, this study revealed the significant effects and underlying mechanisms of sports video game training in enhancing children's executive functions. It not only enriches the theoretical foundation of the motor-cognitive field but also provides a novel intervention approach for educational practice. Future research should prioritize integrated training models, enhance the design of cognitive tasks, and adjust sport intensity according to individual differences to optimize training outcomes.

Keywords sports video game training, executive function, children, sport intensity, cognitive engagement

补充材料：

表 S1　实验 1 儿童各变量基线水平描述统计及方差分析结果

变量	运动视频游戏组 (n = 30)		运动+视频游戏组 (n = 30)		控制组 (n = 30)		F(2, 87)	p	η_p^2
	M	SD	M	SD	M	SD			
干扰抑制									
Stroop 干扰效应(ms)	21.571	55.960	28.657	51.660	9.670	71.116	0.763	0.713	0.017
反应抑制									
No-go 正确率	0.817	0.119	0.783	0.179	0.800	0.166	0.339	0.469	0.008
工作记忆刷新									
平均正确率	0.516	0.134	0.555	0.149	0.474	0.138	2.466	0.091	0.054
注意转换									
转换代价(ms)	191.700	262.407	143.030	219.525	104.096	151.422	1.239	0.295	0.028

表 S2　各组干预前后儿童执行功能各成分表现的描述统计结果

变量	任务指标	组别	T0 (M±SD)	T1 (M±SD)	T2 (M±SD)
干扰抑制	Stroop 任务 干扰效应(ms)	运动视频游戏组	21.57±55.96	8.48±75.47	4.18±52.15
		运动+视频游戏组	28.66±51.66	33.90±60.00	4.21±85.38
		控制组	9.67±71.17	21.85±62.08	7.91±63.30
反应抑制	Go/No-go 任务 No-go 正确率	运动视频游戏组	0.82±0.12	0.90±0.08	0.94±0.03
		运动+视频游戏组	0.78±0.18	0.87±0.11	0.84±0.18
		控制组	0.83±0.14	0.84±0.13	0.84±0.18
工作记忆刷新	数字刷新任务 平均正确率	运动视频游戏组	0.52±0.13	0.70±0.20	0.78±0.16
		运动+视频游戏组	0.55±0.55	0.69±0.18	0.62±0.14
		控制组	0.47±0.14	0.56±0.18	0.60±0.17
注意转换	注意转换任务 转换代价(ms)	运动视频游戏组	191.70±262.41	139.67±164.56	66.31±100.19
		运动+视频游戏组	143.03±219.52	141.95±164.58	28.31±143.86
		控制组	104.09±151.42	65.71±127.21	41.84±140.20

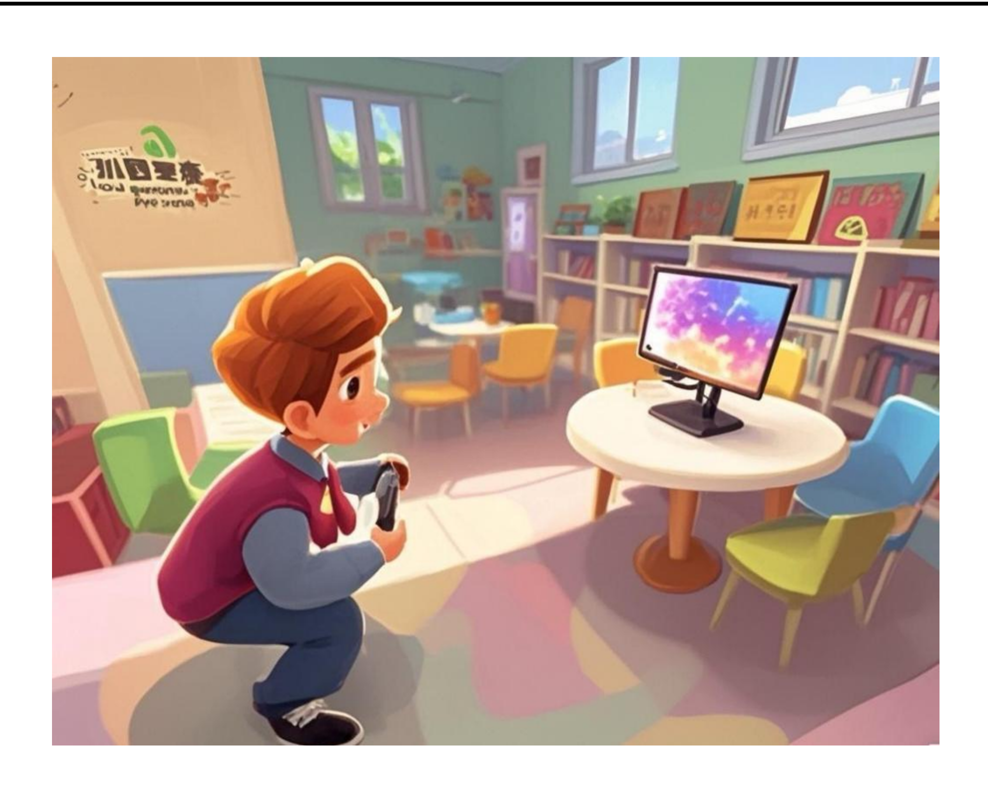
表 S3　实验 2 儿童各变量基线水平描述统计及方差分析结果

变量	高运动强度+高认知参与组	低运动强度+高认知参与组	高运动强度+低认知参与组	低运动强度+低认知参与组	F(3, 116)	p	η_p^2

	(*n* = 30)		(*n* = 30)		(*n* = 30)		(*n* = 30)				
	M	*SD*	*M*	*SD*	*M*	*SD*	*M*	*SD*			
反应抑制											
NOGO 正确率	0.760	0.085	0.728	0.068	0.743	0.061	0.720	0.078	1.772	0.156	0.044
工作记忆刷新											
平均正确率	0.536	0.050	0.528	0.068	0.523	0.055	0.562	0.059	2.651	0.052	0.064

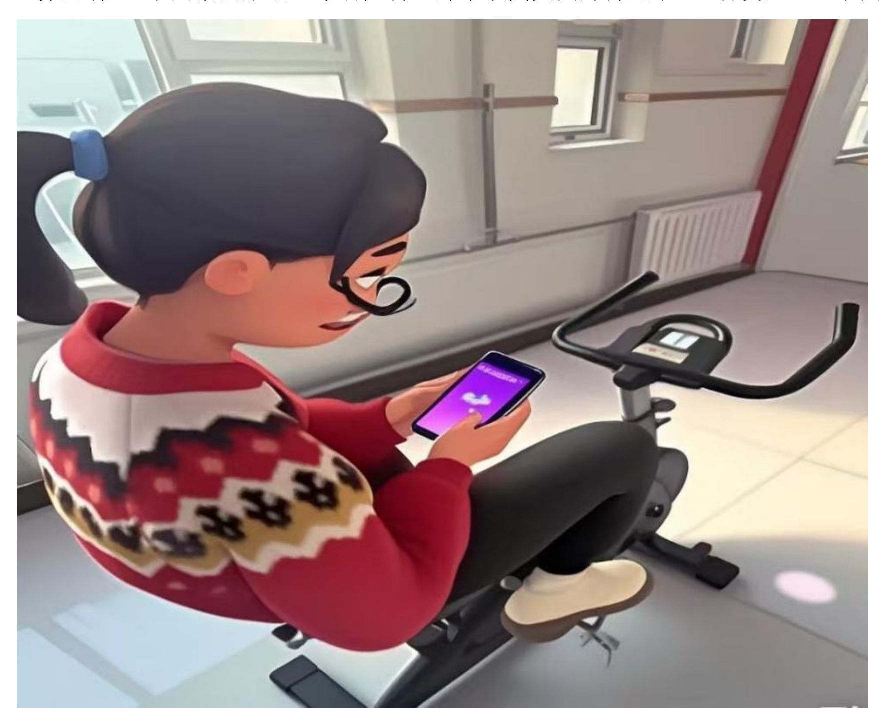
表 S4 各组干预前后儿童反应抑制和工作记忆刷新表现的描述统计结果

变量	任务指标	组别	T0 (M±SD)	T1 (M±SD)	T2 (M±SD)
反应抑制	Go/No-go 任务 No-go 正确率	高运动强度+高认知参与组	0.54±0.05	0.79±0.07	0.82±0.05
		低运动强度+高认知参与组	0.53±0.07	0.72±0.09	0.75±0.04
		高运动强度+低认知参与组	0.52±0.06	0.67±0.07	0.70±0.07
		低运动强度+低认知参与组	0.56±0.06	0.60±0.09	0.62±0.04
工作记忆刷新	数字刷新任务平均正确率	高运动强度+高认知参与组	0.76±0.08	0.90±0.03	0.92±0.04
		低运动强度+高认知参与组	0.73±0.07	0.87±0.05	0.88±0.04
		高运动强度+低认知参与组	0.74±0.06	0.79±0.14	0.80±0.11
		低运动强度+低认知参与组	0.72±0.08	0.73±0.17	0.72±0.18



附图 S1　实验 1 运动视频游戏训练组具体干预手段

注：考虑到伦理学因素的影响，本研究将全部干预真实图片都进了 AI 动漫处理。下同。



附图 S2　实验 1 运动+视频游戏训练组具体干预手段



附图 S3　实验 1 控制组具体干预手段



附图 S4　实验 2 高运动强度+高认知参与组具体干预手段



附图 S5　实验 2 低运动强度+高认知参与组具体干预手段



附图 S6　实验 2 高运动强度+低认知参与组具体干预手段



附图 S7　实验 2 低运动强度+低认知参与组具体干预手段